

10/507003

PCT/JP03/02418

日本国特許庁

03.03.03

JAPAN PATENT OFFICE

08 SEP 2004

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2002年 3月 8日

REC'D 25 APR 2003

WIPO

PCT

出願番号

Application Number:

特願2002-063942

[ST.10/C]:

[JP2002-063942]

出願人

Applicant(s):

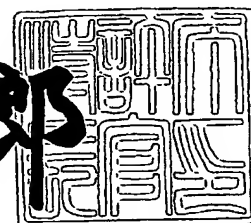
シャープ株式会社

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2003年 4月 8日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田信一郎



BEST AVAILABLE COPY

出証番号 出証特2003-3024595

【書類名】 特許願

【整理番号】 182063

【提出日】 平成14年 3月 8日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H01S 3/00
H04B 9/00

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

【氏名】 平松 卓磨

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

【氏名】 下中 淳

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

【氏名】 森本 直行

【特許出願人】

【識別番号】 000005049

【住所又は居所】 大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号

【氏名又は名称】 シャープ株式会社

【代理人】

【識別番号】 100062144

【弁理士】

【氏名又は名称】 青山 葆

【選任した代理人】

【識別番号】 100086405

【弁理士】

【氏名又は名称】 河宮 治

【選任した代理人】

【識別番号】 100084146

【弁理士】

【氏名又は名称】 山崎 宏

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 013262

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0003090

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光源装置およびそれを用いた光通信モジュール

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 半導体レーザからの誘導放出光が多重散乱光学系を介して自由空間に放出される光源装置であって、

上記多重散乱光学系は、上記半導体レーザに近接する第 1 の領域とその第 1 の領域に接して自由空間に至る第 2 の領域からなり、

上記第 1 の領域と上記第 2 の領域のうちの少なくとも上記第 1 の領域に上記第 2 の領域よりも散乱体を高濃度を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の光源装置において、

上記第 2 の領域が、上記第 1 の領域と上記第 2 の領域との間の境界面に形成される 2 次的な面光源の少なくとも主要部分に対する拡大鏡を有することを特徴とする光源装置。

【請求項 3】 請求項 1 または 2 に記載の光源装置において、

上記散乱体の粒径最頻値 D_s と上記半導体レーザの上記第 1 の領域の母材中での発振波長 λ との関係を表すサイズパラメータ q を、

$$q = (2\pi / \lambda) \cdot (D_s / 2)$$

とするとき、上記散乱体の粒径最頻値 D_s は、上記サイズパラメータ q が略 1 ～ 50 を満たす範囲にあり、かつ、上記散乱体の平均最近接距離が上記散乱体の粒径最頻値 D_s の 20 倍以下となるように、少なくとも上記第 1 の領域に上記散乱体が高濃度に分散された部分を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 4】 請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 つに記載の光源装置において、

上記第 1 の領域がゲル状またはゴム状の物質を母材とすることを特徴とする光源装置。

【請求項 5】 請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 つに記載の光源装置において、

上記第 1 の領域の形状を定める壁面および底面を有し、上記壁面および底面の少なくとも一部に金属層が形成され、上記底面に上記半導体レーザが直接または間接に固着された凹部を備え、

上記凹部の上記壁面および底面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表

面が上記半導体レーザからの誘導放出光の散乱光に対する反射面となることを特徴とする光源装置。

【請求項6】 請求項5に記載の光源装置において、

上記凹部の壁面及び底面の少なくとも一部に形成された上記金属層は、少なくとも、上記第1の領域内に空間分布する散乱光の到達範囲内において、金属以外の物質が露出しないよう連続的に形成されることを特徴とする光源装置。

【請求項7】 請求項5または6に記載の光源装置において、

上記凹部の壁面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表面が、上記半導体レーザの出射光の光軸方向を、上記第1,第2の領域の境界面側に変える反射面であると共に、

上記第1の領域における上記サイズパラメータ q が略1～15を満たす範囲にあることを特徴とする光源装置。

【請求項8】 請求項5または6に記載の光源装置において、

上記凹部の壁面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表面が、上記半導体レーザの出射光の光軸方向を複数回変える反射面であると共に、

上記第1の領域における上記サイズパラメータ q が略10～50を満たす範囲にあることを特徴とする光源装置。

【請求項9】 請求項8に記載の光源装置において、

上記凹部の開口が底面よりも径が大きく、上記凹部の底面の径に対する深さの比であるアスペクト比を r とし、上記凹部の壁面の法線と上記半導体レーザの出射光の光軸方向とのなす角度を θ [deg] とするとき、

$$\max \{2r, 3\} \leq \theta \leq 20r$$

の条件を満足することを特徴とする光源装置。

【請求項10】 請求項8に記載の光源装置において、

上記凹部を構成する壁面の少なくとも一部は、開口部と底面部の断面形状が略同一の筒状をなし、その筒状の凹部の径に対する深さの比であるアスペクト比を r とし、上記凹部の壁面の法線と上記半導体レーザの出射光の光軸方向とのなす角度を θ [deg] とするとき、

$$\max \{ \arctan(r/5), 3 \} \leq \theta \leq \arctan(r/2)$$

の条件を満足することを特徴とする光源装置。

【請求項 1.1】 請求項 1 乃至 1 0 のいずれか 1 つに記載の光源装置において、

上記半導体レーザは、GaAs 基板上的 InGaAs 層を含む活性層を有し、発振波長が 880 nm ～ 920 nm の範囲であることを特徴とする光源装置。

【請求項 1.2】 請求項 1.1 に記載の光源装置において、

上記半導体レーザは、GaAs 基板上的 InGaAs 層を含む活性層を有し、 $\text{In}_X\text{Ga}_{1-X}\text{As}_Y\text{P}_{1-Y}$ ($0 \leq X < 1, 0 < Y < 1$) で表される 3 元または 4 元からなる層の少なくとも一方を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 1.3】 請求項 1 乃至 1.2 のいずれか 1 つに記載の光源装置において、

上記半導体レーザが組成または層厚の少なくとも一方の空間的な揺らぎを有することを特徴とする光源装置。

【請求項 1.4】 請求項 1.3 に記載の光源装置において、

上記半導体レーザは、GaAs 基板上的 InGaAs 層を含む活性層を有し、上記組成の空間的な揺らぎを有する $\text{In}_X\text{Ga}_{1-X}\text{As}_Y\text{P}_{1-Y}$ ($0 \leq X < 1, 0 < Y < 1$) で表される 3 元または 4 元からなる層の少なくとも一方を含むことを特徴とする光源装置。

【請求項 1.5】 請求項 1 乃至 1.4 のいずれか 1 つに記載の光源装置において、

上記半導体レーザに直接または間接に接続されたワイヤの少なくとも一部が、上記第 2 の領域内に存在することを特徴とする光源装置。

【請求項 1.6】 請求項 1 乃至 1.5 のいずれか 1 つに記載の光源装置を送信手段に用いたことを特徴とする光通信モジュール。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

この発明は、トランスファーマールドやポッティング等により光学的なレンズ作用を持たせて樹脂封止された光源装置およびそれを用いた光通信モジュールに

関する。

【0002】

【従来の技術および発明が解決しようとする課題】

近年、I r D A (Infrared Data Association)規格に準ずる赤外線通信モジュールは急激な小型化が進み、短距離(20cm)仕様品はレンズ部分の径や高さが1mm~2mm程度となるまでに至っている。通信速度については、I r D Aにおいても徐々にではあるが高速化が進む一方、光無線LAN製品では、砲弾型のLEDを20個以上並列して光量を稼ぐ基地局と、鋭い指向性および追尾機能を有する端末装置との間で、数mの通信距離と100Mbps程度までの高速性の両立が図られつつある。

【0003】

このようなワイヤレス光通信技術には、指向性や遮蔽が問題となる場面もあるが、高速性や秘匿性、特にコスト面の優位性を活かして、パームトップまたはハンドヘルドタイプの携帯端末装置の高速インターフェイスとしてその応用展開が期待される。しかしながら、上記高速光無線LAN(ローカル・エリア・ネットワーク)製品は一般的にサイズが大きく消費電力も相当に大きい。また過去には、高速化を重視して、比較的安価な近赤外波長域の半導体レーザをアイセーフ化してワイヤレス光通信に用いる試みが少なからずあったが、比較的大掛かりな拡散板やビーム整形光学系を用いるものが多く、I r D A準拠品並みの小型化や低価格化を実現するのは困難であった。

【0004】

すなわち、既存のI r D Aと光無線LANの2者の間を埋め、より高速かつ広範囲な通信エリアを持つワイヤレス光通信システムを実現するために必要な、小型かつ安価な光通信モジュールは、未だかつて実用に供されていない。

【0005】

そこで、この発明の目的は、簡単な構成で、高出力半導体発光素子を用いても人の目に安全で高い光の取り出し効率が得られると共に、低消費電力でかつ小型化と低コスト化ができ、高速かつ広範囲な通信エリアを有する光通信システムに適した光源装置およびそれを用いた光通信モジュールを提供することにある。

【0006】

【課題を解決するための手段】

ここ数年にわたり、高速CD-R/RWドライブやファイバアンプ励起光源に用いられる近赤外域(780nm帯, 980nm帯)のGaAs系半導体レーザの高出力化技術には大いに進展があった。現在では、2 μ m \sim 6 μ m程度の狭ストライプ幅での単一基本横モード動作において、CW(Continuous Wave; 連続波)100mW \sim 300mWレベルの高出力化と数1000時間以上の信頼性が達成されるに至っている。また、青色乃至は紫外域に発振波長を有するInGaN系半導体レーザも実用化に向けて開発が進み、次世代光ディスク用の書き込み光源として使用可能な30mW以上の高出力も安定に得られるようになってきている。

【0007】

自由空間にビームを放出する用途を想定すると、国際安全規格IEC60825-1や、国内においてはJIS C6082等で定められるアイセーフティが満足されねばならない。特に民生機器への応用においては、光源からの出力光が何らかの光学系を介して直接目に入射する場合にも失明する危険のないクラス1レベルのアイセーフティが望まれる。

【0008】

そこで、上記のような高出力半導体レーザの出力光を、特定のアパレント光源サイズに損失なく変換するアイセーフ化技術が確立されれば、先に述べたような次世代ワイヤレス光通信向けの基幹デバイスが実現されることとなる。本出願人は、そのための要素技術として、樹脂封止モジュール内部または送信レンズの内部に、3次元的に散乱材を導入することで空間的なコヒーレンスを低減する技術に注目した。

【0009】

インコヒーレントな光源である発光ダイオード(LED)の分野においては、輝度ムラの改善や白色LED向けの波長変換等の目的に応じて、各種粉体材料(いわゆるフィラー)を封止樹脂中に混入させることは周知である。例えば、特開昭59-112665号公報や特開2000-200928号公報等によい例を見ることができる。しかしながら、半導体レーザを搭載する小型光源装置において

、高い空間的コヒーレンスを低減するという観点から散乱材(フィラー)技術を詳細に検討した例は、本出願人の知る限り存在しない。

【0010】

一方、コヒーレント光学や照明光学の分野においては、コヒーレンス度(Degree of Coherence)の空間分布が異なる任意の面光源から、同一の放射強度分布(Radiant Intensity)を構成し得ることが、面光源における等価定理(Equivalence Theorem of Planar source)として知られている(例えば、Mandel & Wolf著, Optical Coherence and Quantum Optics, 1995 Cambridge University Press, 第5章参照)。すなわち、半導体レーザーの出力光を何らかの散乱体を通して拡散させ、放射強度の角度分布を半導体レーザーのそれと変わらぬよう光学系を構成することが、原理的には可能である。

【0011】

しかしながら、上記分野のアプリケーション/インプリメンテーションにおいて利用される散乱体は、すりガラスやホログラムレリーフによる拡散板に代表されるように、表面または界面の粗さ・形状を利用して、入射光の位相および散乱角を局所的かつランダムに変化させるのが一般的である。これらは光源素子とは独立した光学素子であって、別途固定手段とそのスペースを必要とするため、光源系全体としてバルキーにならざるを得ない(かさが大きくなる)。あるいは、上記拡散板を軸周りに回転させたり、液体等に超音波を印加して動的回折格子を形成する等の技術も利用されているが、当然一段と大掛かりな光学系となる。

【0012】

また、生体組織等の散乱体が密に詰まった光学的に厚い試料の性質を解析する場合、一般的には透過配置で前方散乱特性を調べることが行われている。基礎データとしての各種微粒子、血液や各部組織など個別のサンプルのコヒーレント散乱光成分の減衰や偏光解消等の諸特性に関する研究が蓄積されているものの、この発明で望まれるように、レーザー光源のコヒーレンスを微小体積内で効果的に消失させるという観点から多重散乱光学系の構成方法を系統的に示す研究はほとんど行われていない。

【0013】

ところで、通常の半導体レーザの実装形態であるハーメチックシールのCANパッケージではなく、樹脂モールドパッケージを採用して低価格化を図る試みも従来からなされている。例えば、特許第2927044号や特開平08-236873号公報等が参考となる。しかしながら、これらの技術は、光ディスク応用などの結像光学系への適用を狙って、半導体レーザが本来有する高い空間的コヒーレンスを保持することが大前提であって、それらの主旨、用途、技術的な背景は、この発明が対象とする多重散乱光学系とは大きく異なるものである。

【0014】

この発明では、上記のように、高出力半導体レーザを搭載して出力光を安全に自由空間に放出することが可能な小型の光源装置や部品モジュールを、実際に安価に製造して実用に供するための種々の方法を明らかにしている。この発明で開示される構成に従えば、空間的コヒーレンスが十分に低減された上で、例えば1mm径のアパレントな光源サイズを有するモジュールにおいて、 30° の半値全幅の放射角で自由空間に発散するように制御されたビームが形成される。この場合、国際安全規格IEC80625-1 Amendment 2に従えば、例えば850nmの波長帯においてはCWで最大150mW程度の光出力が許容される。実際に際しては、ワイヤレス光通信モジュールの光源として、クラス1レベルのアイセーフティと同時に、放射角がある程度広くてかつ広すぎず(例えば $60^\circ \geq$ 半値全幅の放射角 $\geq 30^\circ$)、不要な広角への放射(裾引き)が抑制されて、140mA以下の駆動電流で120mWのピーク出力が得られ、モジュール全体の厚みが3mm以下である高効率の超小型光源といった要求仕様が想定される。

【0015】

したがって、本出願人は、典型的には出力光軸方向に1mm～数mm以下程度のディメンジョン(寸法)を有する極めて微小な3次元構造体内において、半導体レーザからの出力光のコヒーレンスを低減しつつ、放射強度分布がよく制御された光源装置を構成するために、構造体内の特定の領域に散乱体を高濃度に分散させた多重散乱光学系を用いる手法を詳細に検討した。特に、散乱体の径や屈折率と分散濃度による上記微小な3次元構造体内での平均散乱回数、または、平均自由行程および輸送自由行程と、ランダムな干渉過程の結果生じるスペックルとの

相関関係、さらには実用的な分散濃度範囲の上限および下限について、クラス1のアイセーフティを満足する条件を見出すための詳細な検討を重ねた。また、拡散板を用いた散乱光学系との比較や、コヒーレンシの低いLEDやSLD(Super-Luminescent Diode)、またはブロードエリア半導体レーザを光源素子として用いる場合との比較も系統的に行った。

【0016】

その結果、上記狭ストライプ幅の高出力半導体レーザを用いた微小な多重散乱光学系において、その近視野像および遠視野像にはアイセーフティおよび放射強度の均一性のいずれにとっても深刻なレベルのスペックルパターンが発生し得るものの、この発明で開示される種々の評価方法および光学系の構成手段を用いることで、極めて効果的にスペックルが低減され、かつその他の光学的特性を両立できることが見出された。

【0017】

ところで、いわゆる中遠赤外線領域で発振可能な材料系や量子カスケード構造の半導体レーザを用いれば、強い近視野像スペックルが残留してもアイセーフティを確保することは可能ではある。しかし、上記通信用途では特に遠視野像におけるスペックルが実用上大きな問題となり得る。したがって、遠視野像と近視野像双方のスペックルを十分に低減する必要がある。近視野像スペックルを低減する手段を講じることで、基本的には遠視野像スペックルも低減される傾向にあるが、遠視野像のスペックルはある程度の改善レベルで飽和することもある。しかし、アイセーフティが確保されている場合には、放射強度の半値角(ピーク強度の半値となる放射角)以内の角度において半値を下回る擾乱(スペックルの振幅変動)が生じなければ、実用上差し支えはないと見なすことができる。

【0018】

さて、近視野像のスペックルに関しては、散乱材で白濁化した光学系は一見集光性が低く見え安心感があることから、かえって人体を危険にさらすことになりかねない。また、比較的によく設計された拡散板やホログラム光学素子を用いる場合であっても、スペックルを完全に消失させることは容易ではない。

【0019】

参考のため、特開平8-264885号公報に見られるいわゆる拡散板を用いて半導体レーザの空間的なコヒーレンスを低減した光学系の構成を図16に示している。図16に示すように、半導体レーザ1600をステム1601上にダイボンドにより固定し、ワイヤボンディングにより電氣的接続が行われている。そして、上記半導体レーザ1600が搭載されたステム1601を覆うキャップ1602には、通常の低反射コートガラスに代えて、拡散板としての封止部材1603が設けられている。封止部材1603の片側表面を適当な粗面として、半導体レーザ1600からの出射光の空間的なコヒーレンスを低減する。透明半導体基板に対するエッチングやホログラム技術を用いることによって、拡散板を薄く形成し、小型の光源装置として構成されている。この光源装置の近視野像と遠視野像を後述する方法で評価したところ、遠視野像のスペックルは許容範囲内で製造できる場合もあった。しかしながら、放射強度分布(FFP)では半値角以上の広角成分が大きく、理想的なガウシアン形状のFFPに対して軸上放射強度が最大2割以上減少した。さらに、近視野像においては極めて大きなスペックルが発生し、拡散板の散乱面に工夫を施してもクラス1のアイセーフティを満足することは難しいことが分かった。

【0020】

図16の構成によれば、半導体レーザ1600から放出された誘導放出光が、それを吸収／散乱しない封止気体領域1604を経て上記封止部材1603の散乱面に達し、自由空間に散乱光1605として放射される。このような表面を粗面化した拡散板を用いる場合、レーザ光が受ける散乱回数は極めて少なく、典型的には1回乃至高々数回程度である。したがって、少なくとも上記封止部材1603の粗面のグレインサイズ程度の局所領域内では空間的なコヒーレンスが失われず、グレイン内または隣接するグレイン間の相互作用によって近視野像には顕著なスペックルが発生する。また、このような表面を粗面化した拡散板を用いる場合、アパレント光源サイズはレーザ素子の放射角特性と散乱面までの距離から幾何学的に決まるため、予め各部のディメンジョンの確定した小型の光源装置においては所望のサイズにまで拡大することが事実上困難となる。逆に、大きな光源サイズを得ようとすれば、レーザ素子と散乱面間の距離を大きく取らざるを得な

い。

【0021】

このような近視野像スペックルを有する微小光源からの出力光が、何らかの光学系を介して(状況によっては介さずとも)眼球に入射すると、網膜上に結ぶ像に含まれるスペックルの微細構造によって、局所的パワー／エネルギー密度の集中を招きレーザー光源特有の網膜熱損傷を惹起し得る。したがって、少なくとも、固視状態の眼球の自然な動き以下までスペックルパターンの構造を微細化し、かつ擾乱振幅が明瞭に観測できなくなるまで、時間的・空間的なコヒーレンスを低減することが望まれる。

【0022】

一般的に、人間の眼球は1点を凝視した状態でも、静止せずに不随意運動している。フリック(0.03秒～5秒の間に1回、角度約20分の飛躍)、ドリフト(1秒当たり約0～30分のドリフト)、トレモロ(30Hz～100Hzでの約15分の微震動)の3成分が固視微動と総称されている。網膜上の像位置としては、高周波数成分として1秒あたりに数10回、数10 μ m程度の振幅で微震動しており、この移動量は、一般的に空間周波数が数10本/mm以上の平行縞のコントラストを認識することが困難であるという事実と符合する。

【0023】

典型的に観測される危険な状態のスペックルの光強度空間分布には、その最大値の $1/e$ (e は自然対数の底)以下にまで落ち込む急峻な微細構造が2次元的にランダムに空間分布する。特に、上記100Hz程度の振動成分による網膜上の像移動量(10 μ m以上程度)と同程度、乃至は0.1mm程度までの広がりを持つ微小なピークスポットが近視野像に多数含まれる場合、各スポットでの単位面積あたりのエネルギー密度が例えば平均値の5倍以上と大きくなり、網膜に重大な影響を及ぼし得る。

【0024】

レーザー光源に対して空間的コヒーレンスを低減する何らかの手段を講じて光源サイズが拡大されている状況下では、LEDとのアイセーフティに関する本質的な違いは上記の点に集約される。なお、ある光源からのビームが何らかの集光光

光学系を介して網膜上に集光される場合、像スポットサイズは集光系の色収差の影響を強く受ける。実際、LED等の幅広い連続スペクトルを有する光を波長限界近くまで集光できない原因は、空間的コヒーレンシが低いことと並んで色収差の影響が大きい。後者は現状の安全規格では考慮されておらず、また定式化することも困難であるが、レーザ光源を対象とするこの発明の各手段や諸効果には何らかわるところはない。

【0025】

上記のように単一面光源の近視野像がスペックルを含む状況は、IEC 60825-1規格等でアレイ光源に対してなされる考慮と以下の点で異なる。すなわち、個々のスペックルスポットが含む光パワーは、レーザからの全出力または面光源全体が有する光パワーに対してはわずかの割合を占めるのみである。各スポットでの局所的なエネルギー密度／パワー密度の増分は、PAR (Peak-to-Average Ratio)の局所的最大値とピークスポット面積の比で表される。したがって、上記微動量以下程度まで個々のスペックルスポットサイズを低減し、かつ、PARの期待値(=1)からの揺らぎの振幅を典型的には1/100以下程度まで低減することが両立されれば、同一のアパレントサイズを有するLED光源と同等のクラス1レベルのアイセーフティを確保することが可能である。

【0026】

以下では、この発明が対象とする微小な多重散乱光学系の特徴と、解決すべき課題をまとめる。

【0027】

まず、第1の特徴は、多重散乱光学系に入射する光は、ほぼ点光源から放出されるビームと見なされることである。光源装置全体は、樹脂基板やリードフレームまたはステム上に形成された微小光学系として、光源から自由空間までが一体化されて構成されたものを想定する。したがって、通常のコヒーレント光学系において一般的に行われるように、ビーム径をビームエキスパンダで数mm以上に拡大した後、多重散乱領域に入射させるような、空間的コヒーレンシを低減する光学的操作を行うことはできない。

【0028】

第2の特徴として、多重散乱光学系において、光源から自由空間までの幾何学的距離は1 mm～数mm程度の極めて小さな光学系を想定している。したがって、多重散乱回数を稼ぐために、任意に光軸方向に長い光学系を構築することはできない。また、可動部や複合レンズ系等、一体部品としての形成が困難または不可能な構成は採用し難い。加えて、光学系全体のサイズが小さい故に、各工程や構成要素の精度が不足しがちであることも問題解決を難しくする。

【0029】

第3の特徴として、光源として用いられる半導体レーザは、比較的狭い1 μm ～10 μm 程度のストライプ幅を持つ単一横モードの高出力レーザであることが望ましい。このような光源を用いることによって、LEDやSLD等の連続的な波長スペクトル分布を有するコヒーレンスの低い光源素子を用いる場合に比べ、格段の低消費電流化や従来実現不可能であった高出力化と高速化が両立される。しかしながら、通常の狭ストライプ半導体レーザがmW以上程度で動作する場合、スペクトル線幅は典型的に10 MHz程度、コヒーレンス長(振幅分割した2つの光波が干渉可能な最大光路差)は、数10 m以上程度である。数10 mW以上の高出力動作では、一般的には出力の逆数に比例して線幅が狭くなるが、場合によっては、縦モード間相互作用やゲイン飽和、定在波効果による軸方向またはストライプ横方向のホールバーニング(共振器内での電界強度分布の不均一性による局所的な利得飽和)等の非線形効果等によって、スペクトル線幅は逆に10 MHz以上程度に広がり、コヒーレンス長は数m以下程度となることもある。いずれにせよ、外部共振器等による強制的な周波数変調を行わない、通常のレーザのコヒーレンス長は、この発明で想定する光学系のディメンジョン(寸法)よりも遥かに長い。

【0030】

上記諸課題の解決にあたって、スペックルパターンを本質的に消失させるには、多重散乱領域内での散乱光路長の分布を半導体レーザ固有のコヒーレンス長以上に十分長くとり、多重散乱光学系から出力される散乱光成分がコヒーレンスを時間的に喪失した状態とすることが十分条件となる。これは、必ずしも光学系の全長自体がコヒーレンス長以上必要ということの意味するわけではない。すなわ

ち、高次の多重散乱によって実際の散乱光路長(またはその平均値)を幾何学長の数倍から数10倍以上にまで拡大したり、半導体レーザの線幅を何らかの手法により意図的に広げたりすることができる。

【0031】

しかしながら、半導体レーザ自身の時間的なコヒーレンスを、特殊な素子構造を採用してある程度低減しても、空間的にはほぼ点光源と見なされる状況のままではアイセーフティの向上に寄与しない。一方、この発明のように微小な多重散乱光学系を採用し、波面分割を繰り返して空間的コヒーレンスを低減する場合も、全光路を上記半導体レーザのコヒーレンス長以上に拡大することは容易ではない。散乱領域のボリューム、散乱体の種類やサイズおよび分散濃度等のパラメータを変化させると、散乱光路長分布の変化に応じてスペックルパターンは劇的な変貌を遂げるため、これを制御する手段が必要である。

【0032】

ここまで説明したように、3次元構造内の極めて微小な領域に散乱材を高濃度分散させたスタティックな多重散乱光学系を対象として、半導体レーザの時間的・空間的コヒーレンスおよび放射強度を制御する場合に起こり得る問題点を明らかにし、散乱体の各パラメータ、散乱光路に含まれる反射面の影響、さらに多重散乱光学系全体の設計について具体的指針や最適化例を明示した文献は、本出願人の知る限り存在しない。この発明では、散乱光路長を拡大する種々の手段、または、微小な多重散乱光学系でより効果的に空間的なコヒーレンスを低減するための種々の手段を開示し、アイセーフティの確保に十分なスペックル低減を達成する。

【0033】

上記微小3次元構造の多重散乱光学系においては、各所のパラメータが多岐にわたり、その最適化には拡散板単体の場合等と比べて大きな困難が伴う。例えば、上記スペックルの問題を解消するために、多重散乱光学系の全体にわたって散乱体濃度を上昇させると、自由空間への放射強度において半値角外への裾引き成分が顕著に現れ、動作電力は大幅に増大して光源装置として実用にたえないものとなる。また、散乱体濃度が高すぎる場合、光軸方向への透過光が隠蔽されて光

源として利用可能な出力が十分に得られないことがある。この発明では、単に近視野像および遠視野像のスペックルを問題としないレベルにまで抑制するのみならず、多重散乱光学系を介して自由空間に放出される光の放射強度の角度分布を整え、光源装置として利用可能な光出力を損なうことのない種々の手段を提供する。

【0034】

次に、半導体レーザを取り囲んで一体化された多重散乱光学系を介して、半導体レーザからの誘導放出光を自由空間に放出する微小な光源装置において、上記スペックルの問題を十分に抑制しつつ所望の光学特性を有する多重散乱光学系を実現するための個々の手段を開示し、それらの作用について述べる。

【0035】

上記目的を達成するため、この発明の光源装置は、半導体レーザからの誘導放出光が多重散乱光学系を介して自由空間に放出される光源装置であって、上記多重散乱光学系は、上記半導体レーザに近接する第1の領域とその第1の領域に接して自由空間に至る第2の領域からなり、上記第1の領域と上記第2の領域のうちの少なくとも上記第1の領域に上記第2の領域よりも散乱体を高濃度に含み、上記第2の領域が、上記第1の領域と上記第2の領域との間の境界面に形成される2次的な面光源の少なくとも主要部分に対する拡大鏡を有することを特徴としている。

【0036】

上記構成の光源装置によれば、上記半導体レーザからのレーザ光の空間的コヒーレンスを十分に低減する多重散乱を主に上記第1の領域で生じさせ、放射強度の角度分布特性の制御を主に上記第2の領域の拡大鏡で行って、各部の最適化を切り分けて行うことができる。具体的には、例えば高出力の半導体レーザから、その半導体レーザに近接する第1の領域の母材中に、 μm 程度のスポットから略 $5^\circ \sim 20^\circ$ （接合方向）および $10^\circ \sim 40^\circ$ （層方向）程度の半値全幅を有してコヒーレント光が放出される典型的な状況において、上記第1の領域で平均として数10次以上の多重散乱を経るように、適切な散乱特性を有する散乱体を適切な濃度で分散させる。これにより、微小体積内でもレーザ光の波面が極めて多数

に分割されて効率よく拡散し、統計的に散乱パス間の交差角が広がる。したがって、近視野像においては、特にアイセーフティに関して問題となりうる $0.01 \text{ mm} \sim 0.1 \text{ mm}$ 程度の広がりを持つ局所的ピークは微細化され不明瞭化される。PAR (Peak-to-Average Ratio) の振幅の確率分布はガウス分布と見なされ、PAR の偏差 σ が 10^{-1} 以下あるいは 10^{-2} 以下と極めて小さいレベルに低減される。このように、半導体レーザに近接する上記第 1 の領域内において、少なくとも数 10 次以上の多重散乱を経ることにより、上記第 1 の領域と第 2 の領域の界面には、有限のサイズに拡大された単一の 2 次的面光源が形成され、2 次的面光源全体として見ればグローバルな空間的コヒーレンスを喪失する。上記 2 次的面光源から放射されるレーザ光は、高次の多重散乱の結果、完全ランバートアンに近い放射強度分布を持って上記第 2 の領域に入射する。

【 0 0 3 7 】

さらに、上記 2 次的面光源の少なくとも主要な部分に対する拡大鏡とは、前側焦点付近においた物体(ここでは面光源)の拡大虚像を作るレンズまたはレンズ系のことである。すなわち、外部から上記 2 次的面光源を観察した場合に、第 2 の領域は上記 2 次的面光源の正立虚像を形成するように、拡大鏡の光源側焦点が 2 次的面光源よりもさらに奥に位置するよう配置される。典型的には、上記焦点から上記第 2 の領域のレンズ部分を見込む立体角内に、上記 2 次的面光源の少なくとも主要な部分が収まるように、第 1 および第 2 の領域の境界面を上記焦点よりも光軸前方にシフトさせて配置する。

【 0 0 3 8 】

このように、上記第 1 の領域に接して第 2 の領域を構成することにより、広角への散乱成分まで効率よく集めながら、上記第 2 の領域で上記 2 次的面光源の近視野像が遠視野像に変換される過程において、光の経路が局所的に低角で重なり合う確率が低減される。したがって、遠視野像のスペックルを抑制しつつ放射強度の均一性が高く切れのよいビームパターンを形成し、微小な多重散乱光学系においても、好ましい光学特性とアイセーフ確保とを両立することができる。

【 0 0 3 9 】

また、この光源装置は、近赤外線領域の高出力半導体レーザを組み込んだワイ

ヤレス光通信モジュールや、青紫乃至紫外域の半導体レーザを波長変換機能を有する散乱材によって白色光源化した小型の映像プロジェクタ等に対して好適に用いることができる。

【0040】

なお、この光源装置においては、上記多重散乱光学系の第2の領域が含んでもよい散乱体の濃度は、上記第1の領域が含む散乱体の濃度の $1/10$ 以下であることが望ましい。また、上記第1の領域の散乱体とは異なるフィラー材料、すなわちレーザ光の散乱機能を有さないものであれば、上記濃度範囲を逸脱して分散させてもよい。いずれにせよ、上記第2の領域においては、レーザ光は平均として高々数回程度の散乱を受けるのみであることが望ましい。これにより、多重散乱領域としての作用は主として第1の領域でなされ、放射強度の半値角外への不要な裾引きが抑制された均一性の良好なビーム光学系が、アイセーフティの確保と両立して構築される。

【0041】

また、一実施形態の光源装置は、上記散乱体の粒径最頻値 D_s と上記半導体レーザの上記第1の領域の母材中での発振波長 λ との関係を表すサイズパラメータ q を、

$$q = (2\pi/\lambda) \cdot (D_s/2)$$

とするとき、上記散乱体の粒径最頻値 D_s は、上記サイズパラメータ q が略 $1 \sim 50$ を満たす範囲にあり、かつ、上記散乱体の平均最近接距離が上記散乱体の粒径最頻値 D_s の 20 倍以下となるように、少なくとも上記第1の領域に上記散乱体が高濃度に分散された部分を含むことを特徴としている。

【0042】

レイリー散乱とミー散乱の境界状態において、比較的等方性が高く断面積の大きい散乱特性が得られることは古典的散乱理論からも知られる。しかしながら、上記多重散乱光学系におけるスペックルパターンの詳細な検討から、散乱振幅の不均斉が小さく(等方性が高いながらも後方散乱成分が少なく)、かつ、上記第1の領域として構成されるのに好ましい分散が可能となる散乱体として、典型的に上記サイズパラメータ q を $1 \sim 15$ 、特に $1 \sim 10$ 程度を主とすることが好まし

いことが見出された。または、より微小なある種の多重散乱光学系の構成においては、上記サイズパラメータ q が 10 ～ 50 程度を主とし前方散乱成分を意図的に増すことが好ましい場合がある。また、上記範囲内で複数の粒径分布ピークを有するように、異なる材料または粒径分布を有する散乱体を混合して分散することが好ましい場合もある。

【 0 0 4 3 】

上記第 1 の領域における散乱体と媒質の屈折率差の絶対値 Δn は、典型的には 0.1 以上、望ましくは 0.15 以上の散乱体を主とすることが望ましい。ある種の多重散乱光学系においては、屈折率差 Δn が 0.05 以上程度の散乱体を主とすることで好ましい結果が得られる場合もある。さらに、上記望ましいサイズパラメータ q の範囲内において、積 $\Delta n \cdot q$ が略 2 ～ 8 の範囲に選ぶことが望ましく、特に 3 の近傍となるよう上記サイズパラメータ q を選ぶことが望ましい。個々の散乱体の散乱振幅の角度分布は、屈折率差 Δn には強く依存しないため、散乱振幅の不均斉が小さく、後方散乱成分も比較的少ない望ましい粒子種を選択するための目安を与える。

【 0 0 4 4 】

上記散乱体の各パラメータについては実施の形態とともにその詳細を説明するが、上記の数値的な限定は主に、多重散乱光学系の微小さまたはそこでの高濃度の均一分散の困難さから生じるものであって、多重散乱光学系全体の構成を含めて解決されるべき本質的問題を含んでいる。

【 0 0 4 5 】

さらに、上記多重散乱光学系の第 1 の領域において、上記数 10 回以上の平均散乱回数を、典型的には 1 mm ～ 数 mm の光軸方向ディメンジョン L を有する上記第 1 の領域内で得るためには、散乱平均自由行程を数 10 μ m 以下程度とすることが望まれる。一般論としては、散乱体単体の散乱断面積 σ_s を散乱理論から求め、散乱平均自由行程 l を、

$$l = 1 / (\sigma_s \cdot N_s)$$

(ただし、 N_s は単位体積あたりの散乱体数、数密度)

から、すなわち分散濃度(体積比または重量比)から推定することができる。

【 0 0 4 6 】

そこで、比 $L/1$ を平均散乱回数としてパラメータ化し、多重散乱領域の最適化過程におけるバリスティックな直進光成分の減衰のよい指標とすることができる。一方、散乱体単体の位相関数 $p(\theta)$ により、不均斉因子 g (mean cosine) を

【数 1】

$$g = \langle \cos \theta \rangle = \int_0^\pi \cos \theta \cdot p(\theta) \cdot 2\pi \sin \theta d\theta, \text{ ただし、} \int_0^\pi p(\theta) \cdot 2\pi \sin \theta d\theta = 1$$

により求め、輸送平均自由行程 l_{AVE} を、

$$l_{AVE} = 1 / (1 - g)$$

で定義することができる。この関係を用い、輸送平均散乱回数 L/l_{AVE} をパラメータとすることで、多重散乱領域内の光軸方向への光の伝播によるコヒーレンシの消失過程の指標とすることができる。特に、この光源装置においては、望ましいサイズパラメータ q を満たす散乱体を用い、上記輸送平均散乱回数 L/l_{AVE} を指標とすることで、スペックルを極めて低いレベルまで低減し、クラス 1 のアイセーフティを満足する各部の組み合わせ条件が抽出できることが判明した。

【 0 0 4 7 】

ここで、散乱体がランダムに空間分布する限りは、散乱体濃度または体積比が大きくなるほど上記平均散乱自由行程 l は短くなるという事実に基づいて、上記手法によってこの光源装置の多重散乱光学系を望ましく構成することができる。典型的には、0.5 vol % ~ 30 vol % 程度の分散濃度範囲において好ましい製造条件を見出すことができる。しかしながら、散乱体が直接接し得るような高濃度の分散体においては、スペックルの低減という観点から好ましくない事象が発生し得る。原因の 1 つは微粒子の 2 次凝集の問題であり、もう 1 つは散乱体の空間分布が稠密構造を取るなどしてランダムさが減少することである。可能な限り微小な光学系で効率よく空間的なコヒーレンシを低減するために、上記望ましい散乱体粒径の範囲において、必要最低限の分散濃度を明らかにすることが、実際の製造工程を管理する上で重要である。

【 0 0 4 8 】

そこで、上記第1の領域に主として分散される散乱体の平均最近接距離を、上記散乱体の粒径最頻値 D_s の20倍以内程度となるように分散させることにより、mmオーダの極微小な多重散乱光学系において、好ましく数10回～数100回の多重散乱を生じさせてアイセーフティを確保できることが見出された。

【0049】

また、一実施形態の光源装置は、上記第1の領域がゲル状またはゴム状の物質を母材とすることを特徴としている。

【0050】

上記実施形態の光源装置によれば、硬化後の硬さが所謂針入度やJIS A硬度で規定されるゲル状物質またはゴム状物質(エラストマー等)を用いることにより、第1の領域として硬化させる。これにより、散乱体の沈降等による散乱特性の経時変化を防止すると共に、トランスファーモールドのように樹脂封止等の圧入工程を経て上記第2の領域が形成される場合にも、上記第1の領域を安定に保持することができる。

【0051】

また、ゲル状またはゴム状の物質を母材とすることで、入手の容易な各種散乱体を、強力な剪断力(シア)を有さない簡易な混練・分散装置によっても好ましく均一分散することができる。すなわち、上記1～50の範囲のサイズパラメータ q を有する散乱体を、0.5vol%～30vol%以下程度の濃度範囲でゲル状またはゴム状の物質に分散することにより、概ね上記平均最近接距離を粒径最頻値 D_s の20倍以内程度とする良好な分散状態が得られる製造条件が見出される。典型的には、母材に対する散乱体の体積比1vol%～10vol%程度がスเปックル低減に極めて効果的である。また特に、アクリル系、スチレン系、または変性シリコン系等のポリマー微粒子は、この発明において散乱体として極めて好ましい特性を有する場合があり、一般的なシリコン系のゲルやエラストマーとの間で適切な屈折率差と良好な分散性を確保することが可能である。

【0052】

分散母材として特に、硬化前の流動性が比較的高く、硬化後にも十分な柔軟性を有するシリコンゲルはより好ましく、硬化前の粘度が6000mPa・s以

下程度のものは、例えば容器回転型のミキサー等の簡易型で安価な分散・混練装置に対して極めて好適に用いることができる。また、高濃度分散させる散乱体の粒径分布は、上記サイズパラメータの望ましい範囲内においてその偏差を大きくしたほうが、母材硬化後の硬さ(柔軟性)を適切に保つため、また均質な単分散を得るためにも好ましい。

【0053】

このように、散乱体を適度に高濃度分散し適度な流動性を有するゲル状またはゴム状の物質を半導体レーザに近接して配置し、かつ、その体積および3次元形状を所望の状態に整えて硬化させることにより、多重散乱光学系の第1の領域として極めて好ましい特性を得ることができる。すなわち、半導体レーザ近傍の微小体積内において、効率よく誘導放出光の空間的コヒーレンスを喪失させることが可能になる。

【0054】

上記作用に加えて以下のような諸作用が得られる。すなわち、ゲル状またはゴム状の物質を母材として用いることによって、光学系の他の部分から半導体レーザが受ける熱膨張率の違いによる応力を緩和し、また放熱性を向上して、高出力動作時の信頼性を確保することができる。とりわけ、半導体レーザの光軸上に生じるコヒーレント後方散乱ピーク、すなわちレーザ出射端面への戻り光を発生させて、その光量を散乱体(特に分散濃度)によってある程度制御することが可能になる。典型的には、分散体積比(分散濃度) $1 \text{ vol} \% \sim 30 \text{ vol} \%$ 程度の範囲において、半導体レーザのスペクトル線幅の増大または縦マルチモード化を適度に促して、半導体レーザそのものの時間的なコヒーレンスを低下させ得ることが見出された。ただし、散乱体の分散濃度が $30 \text{ vol} \%$ を超えると典型的には散乱領域の強い隠蔽力からレーザ発振が不安定となって高出力化が図り難い傾向がある。

【0055】

また、一実施形態の光源装置は、上記第1の領域の形状を定める壁面および底面を有し、上記壁面および底面の少なくとも一部に金属層が形成され、上記底面に上記半導体レーザが直接または間接に固着された凹部を備え、上記凹部の上記

壁面および底面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表面が上記半導体レーザからの誘導放出光の散乱光に対する反射面となることを特徴としている。

【 0 0 5 6 】

上記実施形態の光源装置によれば、上記第1の領域の形状を定める壁面および底面を有する凹部を備えることによって、時間的または空間的コヒーレンシを十分に低減するための上記第1の領域が、ゲル状またはゴム状の流動性物質からなる場合にも、体積や3次元形状等、上記第1の領域のディメンジョン(寸法)を明確に規定することができる。すなわち、上記第1の領域の散乱体濃度を制御して、強度分布の均一性が高くサイズが明確な2次的面光源を得ることができる。

【 0 0 5 7 】

また、特に上記金属層が凹部の壁面および底面の少なくとも一部をなすことで、その内部に安定に形成・保持された第1の領域において発生する多重散乱光には、上記凹部の開口部が散逸口となって、全体として第1の領域に閉じ込められつつも第2の領域に向かって導波される。この過程において、空間的コヒーレンシが特に顕著に低下する作用が生じる。

【 0 0 5 8 】

この光源装置の強度分布均一性を高めて光源サイズを明確化する作用、および、空間的コヒーレンシを効率よく低減する作用を、光出力を損うことなく得るために、上記凹部の金属層へと光が入射するときの反射率はあらゆる入射角に対して高いことが望まれる。一般に、より屈折率(複素屈折率実部)が小さい方が全反射の臨界角が小さく、かつ、消衰係数(または複素屈折率虚部の絶対値)が大きい方が臨界角内でもより高い反射率が得られる。したがって、上記凹部の金属層をなす物質として典型的に好ましいのは、金、銀、銅等の金属である。

【 0 0 5 9 】

特に、シリコーンゲルを第1の領域の母材とし、上記金属層を銀とした場合、可視乃至赤外光に対して、全反射臨界角は 10° 未満で臨界角内の反射率も90%以上と高い値が得られる。したがって、上記凹部の金属層をAgベースのメッキ処理、またはAgペースト処理により形成することは実用上極めて好ましく、マグネシウムを含んだメッキ処理を施すことも同じ理由から好ましい。ここで、

上記金属層の表面がごく薄い自然酸化物等で覆われても、上記光学特性上においては問題がなく、電氣的にも通常のダイボンドまたはワイヤボンド等の工程によって良好な導通を得ることができるのは言うまでもない。

【 0 0 6 0 】

また、一実施形態の光源装置は、上記第 1 の領域の形状を定める壁面および底面の少なくとも一部に形成される金属層が、少なくとも、上記第 1 の領域内に空間分布する散乱光の到達範囲内にある主要な部分において、上記金属以外の物質が露出しないよう連続的に形成されることを特徴としている。

【 0 0 6 1 】

すなわち、上記金属層が単一の層からなる場合のみならず、複合的な凹部として、複数の金属層から形成される場合においても、上記単一または複数の金属層以外の全反射特性を示さない物質が、上記主要な部分と直接接することがないよう、上記単一または複数の金属層を連続的に形成する。このように第 1 の領域を構成することにより、第 1 の領域内に空間分布する散乱光が、光軸方向以外に漏れ出すことを効果的に防止することができる。したがって、上記第 1 の領域が有する、光源装置の強度分布均一性を高め光源サイズを明確化する作用、および、空間的コヒーレンスを効率よく低減する作用を、光出力の損失を招くことなく得ることができる。

【 0 0 6 2 】

また、一実施形態の光源装置は、上記凹部の壁面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表面が、上記半導体レーザの出射光の光軸方向を、上記第 1 , 第 2 の領域の境界面側に変える反射面であると共に、上記第 1 の領域における上記サイズパラメータ q が略 1 ~ 1.5 を満たす範囲にあることを特徴としている。

【 0 0 6 3 】

上記実施形態の光源装置によれば、上記凹部の壁面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表面によって、上記第 1 の領域の全体として光軸を 1 回以上折り曲げ、より多くの散乱を生じさせて散乱光路長を広げることができる。また、少なくとも初期の散乱(乱反射)を、波長精度の鏡面であることを想定しない簡易な工程で得られる反射面によって生じさせる。したがって、厳しい小型化の要求

に対して、より小さいディメンジョン(寸法)の多重散乱光学系でスペックルを十分に低減する多重散乱作用を得ることができる。

【0064】

ここで、上記第1の領域内での光軸変換直後には、第2の領域の拡大鏡の光軸に略平行な光線の存在確率が相対的に高くなる。したがって、第1の領域に主として分散される散乱体は、サイズパラメータ q が略1～15の範囲、特に1～10の範囲を満たす比較的小粒径のものとし、上記不均斉因子 g (mean cosine) が1から離れて完全ランバーシアン値($2/3$)に近いかそれを下回る程度とすることが望ましい。これにより、バリスティックな直進光成分を効果的に減衰させ、かつ後方散乱成分を抑制して、光源として利用できる光出力を効率よく得ることができる。上記第1の領域の母材と散乱体の屈折率差は、 $\Delta n = 0.1$ 以上、特に0.15以上程度の散乱体が、散乱振幅の角度依存性に対する要求と規格化散乱断面積を両立する上でより好ましい。

【0065】

上記比較的小きな粒径の散乱体を主として含む構成は、高濃度分散が可能な母材および混練装置の組み合わせが利用可能であれば、最も容易にアイセーフティを確保し、散乱体の隠蔽力等による光損失の影響がない良好な光源特性を得ることが可能である。また、高出力動作が可能な一般的な端面発光型の半導体レーザを、簡便なダイボンドの形態によって実装できるため、上記特性を有する光源装置を極めて低コストで製造することが可能である。

【0066】

上記第1の領域の変形例として、上記散乱体を主(数密度として最大)としながら、上記サイズパラメータ q が略1～15の範囲を逸脱する相対的に大粒径の散乱体を混合分散してもよい。すべての散乱体を含めた平均最近接距離が、最頻径すなわち主として分散される散乱体の最頻径 D_s の略20倍以内程度となるよう分散する。これによって、アイセーフティを満足しつつ光取り出し効率を向上させ、分散工程を容易化する分散条件が見出される。また、上記凹部により形状が定まる第1の領域において、上記混合分散を行うかわりに、第1の領域内で異なるパラメータを持つ散乱体を空間的に分離したり、同じ散乱体を空間的に分散濃

度を変えるなど、上記第1の領域を2層以上の複数の層からなる積層体として構成することも望ましい。上記第1の領域を複数の部分(または層)から構成し、コヒーレントな波面を多数に分割する作用を主眼とする部分と、均斉の高い散乱を多数回発生させることを主眼とする部分の体積を変えることにより、隠蔽力を抑制しつつ十分なスペックル低減効果を得ることが可能である。このように、第1の領域を多層化することにより、分散工程最適化の困難さは低減されるが、トータルのコスト面では不利になる。

【0067】

また、一実施形態の光源装置は、上記凹部の壁面の少なくとも一部に形成された上記金属層の表面が、上記半導体レーザの出射光の光軸方向を複数回変える反射面であると共に、上記第1の領域における上記サイズパラメータ q が略10～50を満たす範囲にあることを特徴としている。

【0068】

上記実施形態の光源装置によれば、上記凹部の壁面の主要な部分に特定の傾斜角度を持たせ、散乱体が存在しないと仮定した場合に、半導体レーザの出射光が2回～5回程度の反射回数で上記凹部の開口に達する構成とすることにより、散乱光路長を格段に大きく取ることができ、比較的小さい体積内、特に第2の領域の光軸方向への厚みが薄い場合に、効果的に多重散乱を発生させつつ光の取り出し効率を高く保ち、かつ、第2の領域との界面に形成される2次的な面光源の均一性を格段に向上させて、スペックル低減を図ることができる。

【0069】

また、上記構成においては、第1の領域に主として分散される散乱体のサイズパラメータ q は略10～50の範囲、特に15～40の範囲にある。すなわち、粒径が比較的大きく、上記不均斉因子 g が1に近いものの方が好ましい。これにより、上記壁面の多重反射と比較的強い前方散乱特性を有する散乱体の多重散乱によって、より効果的に近視野像を均一化し、容易にアパレント光源のサイズを広げることができる。比較的低屈折率差 Δn の散乱体を用いてもよく、シリコーンベースの母材に対して、アクリル系有機微粒子や SiO_2 、他の金属酸化物等も好適に用いることができる。例えば空気中において900nmで発振する近赤外

半導体レーザに対して、サイズパラメータ q が $10 \sim 50$ とは、粒径 D_s で約 $1 \mu m \sim 7 \mu m$ に相当する。上記比較的大きな粒径の散乱体を主として分散する場合、より簡易な混練・分散工程によって容易に微小な多重散乱光学系を構成することができる。また、上記構成では、高出力動作可能な端面発光型の半導体レーザを、簡便なダイボンドの形態によって実装し、所望の特性を有する光源装置を低コストで製造することができる。

【0070】

上記構成においては勿論、屈折率差の大きい TiO_2 等を主な散乱体としても、比較的大粒径の粒子であれば好適に用いることができるが、高屈折率差を有する無機酸化物系の大粒径微粒子は極めて高価となる傾向がある。上記多重反射と多重散乱の組み合わせを用いる構成においては、比較的低屈折率差(典型的には $0.05 \leq \Delta n \leq 0.2$ 程度)であっても大粒径($q \geq 10$ 程度)の散乱体を主とし、上記 TiO_2 のような高屈折率差($\Delta n \geq 0.2$ 程度)で小粒径($q \leq 10$ 程度)の散乱体を副として混合分散することは極めて好ましい。すべての散乱体を含めた平均最近接距離を、粒径最頻径すなわち主として分散される散乱体の最頻径 D_s の 20 倍以内程度とし、スペックル低減の観点から許容可能な範囲内で比較的低い濃度でブレンドすることにより、より簡易な分散工程によって、二次的面光源の均一性と光出力の取り出し効率を、スペックル低減と両立することができる。

【0071】

上記混合分散を行うかわりに、第1の領域内で異なるパラメータを持つ散乱体を空間的に分離したり、同じ散乱体でも分散濃度を変えるなどして、上記第1の層を2層乃至複数の層からなる積層体として構成してもよい。例えば、第1の領域の半導体レーザに近接する大部分の領域を比較的大粒径の散乱体 $10 \sim 100\%$ 分散した層で構成し、その上部に比較的小粒径で高屈折率差の散乱体を $1 \sim 10\%$ 程度分散した薄い層を設けてもよい。上記第1の領域の最上層が仮に凝集体を含む多分散となっても、好ましいスペックル低減効果と光取り出し効率および近視野像の平坦化を両立する分散条件を見出すことができる。このように、上記第1の領域を複数の層または部分から構成し、コヒーレントな波面を多数に分割する作用を主眼とする部分と、均斉の高い散乱を多数回発生させることを主眼

とする部分の体積(または体積比)を変えることにより、第1の領域の構成を最適化することができるが、トータルコストとしては不利になる。

【0072】

また、一実施形態の光源装置は、上記凹部の開口が底面よりも径が大きく、上記凹部の底面の径に対する深さの比であるアスペクト比を r とし、上記凹部の壁面の法線と上記半導体レーザの出射光の光軸方向とのなす角度を θ [deg]とするとき、

$$\max \{2r, 3\} \leq \theta \leq 20r$$

の条件を満足することを特徴としている。

【0073】

上記実施形態の光源装置によれば、上記凹部の開口が底面よりも径が大きく、上記条件を満たすことによって、効果的に多重散乱を発生させつつ光の取り出し効率を高く保ち、かつ、第2の領域との界面に形成される2次的な面光源の均一性を格段に向上させて、スペックル低減を図ることができる。

【0074】

また、上記角度 θ に下限を設けることが望ましい。すなわち、平均散乱回数が数100回を超える多重散乱を生じ得る場合、光出力が隠蔽力されて取り出し難くなる傾向がある。上記凹部の壁面への入射回数が極めて大きくなると、統計的に上記壁面をなす金属層で反射されずに吸収される事象が無視できなくなり、第2の領域に効率よく光を導くことが困難となる傾向がある。そこで、 $2r \leq \theta$ とすることによって、上記多重散乱の平均回数が大きくなりすぎる問題を現実的に回避できることが見出された。上記凹部の壁面の最表面を構成する典型的な金属と、上記第1の領域の母材として典型的なシリコン系ゲルやその他の樹脂系材料の組み合わせでは、全反射の臨界角は $5^\circ \sim 20^\circ$ 程度となる。これに対して、多重散乱光学系の典型的構成例においては、 $3 \leq \theta$ [deg]とすることによって、上記臨界角以内の金属層への平均入射回数が大きくなりすぎる問題を回避することができるが見出された。したがって、 $\max \{2r, 3\} \leq \theta$ 、すなわち $(2r)^\circ$ と 3° のうちのいずれか大きい値よりも上記角度 θ を大とすることにより、上記第2の領域に効率よく光を導くことが困難となるという問題を解決

することができる。

【0075】

上記凹部の壁面を完全に理想的な幾何学形状とすることにより、上記角度 θ は幾何学計算から簡単に求められる。しかしながら、この光源装置においては、より簡易な手段で多重散乱光学系の全要素を構成することが重要であって、例えば回転体による樹脂基板の掘削や、円柱または多角形柱の押圧または打抜等の工程によって上記凹部の構成要素を形成する場合に、特に底面および開口の近傍において理想的な形状や寸法からのずれを生じることが多い。上記 $\theta \leq 20^\circ$ 、さらには $\max\{2r, 3\} \leq \theta$ なる数値限定は、このような実際の製造工程を考慮した上で良品歩留まりを評価して得られたものである。

【0076】

また、一実施形態の光源装置は、上記凹部を構成する壁面の少なくとも一部は、開口部と底面部の断面形状が略同一の筒状をなし、その筒状の凹部の径に対する深さの比であるアスペクト比を r とし、上記凹部の壁面の法線と上記半導体レーザーの出射光の光軸方向とのなす角度を θ [deg]とするととき、

$$\max\{\arctan(r/5), 3\} \leq \theta \leq \arctan(r/2)$$

の条件を満足することを特徴としている。

【0077】

上記実施形態の光源装置によれば、上記半導体レーザーの出射光の光軸方向を複数回変換する構成として、上記第1の領域において、上記凹部を構成する壁面の少なくとも主要な一部は、開口部と底面部の断面形状がほぼ同一の筒状をなし、上記凹部のアスペクト比(深さ/半導体レーザーの光軸方向の径)を r 、上記壁面の法線と半導体レーザー本来の光軸とのなす角度を θ (deg)として、

$$\arctan(r/5) \leq \theta \leq \arctan(r/2)$$

なる関係を満たし、上記半導体レーザーの出射光の光軸に対して上記凹部を構成する壁面の少なくとも主要な一部を相対的に傾斜させて設置してもよい。上記アスペクト比の値によっては上記角度 θ が極めて小さな値を取り得るが、既に述べたように、臨界角以内の金属層への平均入射回数が大きくなりすぎる問題を回避するために、少なくとも 3° 以上の上記角度 θ を与えることが望ましい。また、上

記凹部は必ずしも断面が円形状である必要はなく、半導体レーザの光軸に対して軸対称あることが望ましく、また凹部の壁面形状の軸と半導体レーザの光軸を含む断面において、対向する辺がほぼ平行であれば良いことは言うまでもない。

【 0 0 7 8 】

上記構成においては、第 1 の領域に主として分散される散乱体のサイズパラメータ q は略 1 0 ～ 5 0 の範囲、特に 1 5 ～ 4 0 の範囲にあることを特徴とする。すなわち、粒径が比較的大きく、上記不均斉因子 g が 1 に近いものの方が好ましい。これにより、上記壁面の多重反射と比較的強い前方散乱特性を有する散乱体の多重散乱によって、より効果的に近視野像を均一化し、容易にアパレント光源のサイズを広げることができる。また、比較的低屈折率差 Δn の散乱体を用いることもできる。

【 0 0 7 9 】

先に述べたように、比較的低屈折率差(典型的には $0.05 \leq \Delta n \leq 0.2$ 程度)で大粒径($q \geq 10$ 程度)の散乱体を主とし、比較的低屈折率差が大きく($\Delta n \geq 0.2$ 程度)で小粒径($q \leq 10$ 程度)の散乱体を副として、それぞれをスペックル低減の観点から許容可能な範囲内で混合分散することは、2 次的面光源の均一化と光出力の取り出し効率向上を図りながら、分散均一性を向上しスペックルを低減でき好ましい。あるいはまた、先に述べたように、上記混合分散を行うかわりに上記異なるパラメータを持つ散乱体を、空間的に分離したり分散濃度を変えたりして、上記第 1 の領域を 2 層乃至複数の層からなる積層体として構成してもよい。

【 0 0 8 0 】

また、一実施形態の光源装置は、上記半導体レーザは、GaAs 基板上の InGaAs 層を含む活性層を有し、発振波長が 8 8 0 n m ～ 9 2 0 n m の範囲であることを特徴としている。

【 0 0 8 1 】

上記実施形態の光源装置によれば、上記 GaAs 基板上の InGaAs 層を含んだ活性層を有する上記半導体レーザから誘導放出される 8 8 0 n m ～ 9 2 0 n m の波長帯の光は、受光素子として代表的な Si フォトダイオードのピーク感度波長

に近く、この光源装置は光通信の送信手段として適する。また、このような半導体レーザの閾値電流および温度特性は、780nm帯の半導体発光素子等と比べて格段に向上する。したがって、この光源装置によれば、ワイヤレス光通信向けに、クラス1のアイセーフティを満たし、かつ最も安価で優れた電氣的・光学的特性をあわせ持つ光通信モジュールを実現することができる。

【0082】

また特に、光密度の高い層、例えばInGaAs層に近接する量子バリア層や光ガイド層、あるいは活性層とは別に設ける光ガイド層等を、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($0 \leq x < 1, 0 < y < 1$) で表される3元または4元からなる層の少なくとも一方を含めて構成しAlフリー化することによって、上記880nm～920nm波長帯において、最も高出力化が図れるアイセーフ光源装置を提供することが可能となる。したがって、この光源装置を用いることにより、ワイヤレス光通信向けに、クラス1のアイセーフティを満たし、最も安価でかつ優れた電氣的・光学的特性をあわせ持つ光通信モジュールを構成することができる。

【0083】

また、一実施形態の光源装置は、上記半導体レーザが組成または層厚の少なくとも一方の空間的な揺らぎを有することを特徴としている。

【0084】

上記実施形態の光源装置によれば、上記半導体レーザの活性層等の結晶成長時に、意図的に島状の3次元成長を行って特にその層厚分布を顕著に発生させて擬似的なゲイングレーティング(Gain Grating)を形成することによって、レーザ動作時のスペクトル線幅を拡げることができる。また、量子井戸バリア層や光ガイド層等の結晶成長において、意図的に局所的な組成揺らぎを生じる成長を行うことで擬似的なインデックスグレーティング(Refractive-Index Grating)を形成することによって、スペクトル線幅を拡げることができる。したがって、上記組成または層厚の揺らぎを有する半導体レーザは、スペックルの低減に有効である。

【0085】

また、一実施形態の光源装置は、上記半導体レーザが、GaAs基板上のInGaAs層を含む活性層を有し、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($0 \leq x < 1, 0 < y < 1$) で表

される 3 元または 4 元からなる層を含み、上記各層の少なくとも 1 つが組成または層厚の少なくとも一方の揺らぎを有することを特徴としている。

【 0 0 8 6 】

上記実施形態の光源装置によれば、上記 InGaAs 層を含む活性層を用いること、さらに量子井戸バリア層として GaAsP 3 元系材料または InGaAsP 4 元系材料を用いること、または、光ガイド層として GaAs に格子整合する InGaAsP 4 元系材料を用いることにより、以下の際立った作用が得られる。

【 0 0 8 7 】

すなわち、量子井戸として形成される InGaAs 層の結晶成長時に、意図的に島状の 3 次元成長を行って特にその層厚分布を顕著に発生させて擬似的なゲイングレーティング (Gain-Coupled Grating) を形成し、レーザ動作時のスペクトル線幅を拡げることができる。また、量子井戸バリア層または光ガイド層として形成される GaAsP 層または InGaAsP 層の結晶成長において、意図的に局所的な組成揺らぎを生じる成長を行うことで擬似的なインデックスグレーティング (Index-Coupled Grating) を形成し、スペクトル線幅を拡げることができる。このような位相の曖昧な擬似的なグレーティング (Grating) を共振器内に有する半導体レーザから放出される出力光の時間的なコヒーレンスは、干渉実験によるビジビリティ (Visibility; 干渉縞などのコントラストを表す尺度) 観測結果から、通常の高出力半導体レーザのそれと比較して 1 桁以上低下し得ることが確認された。したがって、このような組成または層厚の揺らぎを有する半導体レーザは、多重散乱光学系の第 1 の領域および第 2 の領域と共に、この高出力光源装置の他の構成要素として好ましく併用される。

【 0 0 8 8 】

また、一実施形態の光源装置は、上記半導体レーザに直接または間接に接続されたワイヤの少なくとも一部が、上記第 2 の領域内に存在することを特徴としている。

【 0 0 8 9 】

上記実施形態の光源装置によれば、上記半導体レーザに直接または間接に接続されたワイヤの少なくとも一部が、上記第 2 の領域内にあることによって、上記

第2の領域が破損・剥離しても、上記ワイヤが上記第2の領域とともに引き剥がされて断線するため、半導体レーザへの通電を遮断して、ユーザの目にコヒーレンシが高いままのレーザ光が入らないようにできる。上記作用は上記光源装置の使用中に破損が発生した場合であっても有効であるが、一旦破損した後に上記光源装置の使用を試みる場合に対しても同様に作用することは言うまでもない。

【0090】

また、この発明の光通信モジュールは、上記光源装置を送信手段に用いたことを特徴としている。

【0091】

上記構成の光通信モジュールによれば、上記光源装置を送信手段に用い、さらに例えば受光手段としてSiフォトダイオードを含む光通信モジュールを構成することにより、ワイヤレス光通信向けに、クラス1のアイセーフティを満たし、かつ、最も安価で優れた電氣的・光学的特性をあわせ持つ光通信モジュールを実現することができる。また、特に、光通信モジュールとしては、多重散乱光学系の第1の領域が上記半導体レーザに近接する微小領域として形成されるため、フォトダイオードと集積化・一体モジュール化しても、受信系が感度劣化等の不利益を被ることがない。したがって、安価なSiフォトダイオードとこの発明の光源装置とを組み合わせることで光通信モジュール化することにより、既存のIrDAトランシーバ並みの小型化および低コスト化と、既存の光無線LAN製品並みまたはそれを凌ぐ高速性および広い通信エリアを兼ね備えたワイヤレス光通信に最適な光通信モジュールを実現できる。

【0092】

【発明の実施の形態】

まず、この発明における多重散乱光学系の基本的構成の概要を図1を参照しながら説明し、その後、この発明の光源装置の実施形態におけるスペックルパターンの典型例や低減例およびアイセーフティを確保するための評価基準等について説明する。

【0093】

図1に示すように、半導体レーザ(図示せず)からの光出力は、典型的には μm

オーダのスポット 1 0 0 から放出され、光軸 1 0 1 の方向に指向性を有する。これを取り囲むように近接する第 1 の領域 1 0 2 には、散乱体 1 0 3 が高濃度に均一分散されている。図 1 において、半導体レーザからの時間的にも空間的にもコヒーレンシの高い誘導放出光は、この第 1 の領域 1 0 2 内で多重散乱を受けて拡散しつつ、全体としては第 2 の領域 1 0 4 の光軸 1 0 6 方向に進行する。そうして、上記第 2 の領域 1 0 4 との境界面上には、単一の 2 次的面光源となるスポット 1 0 5 が形成される。

【 0 0 9 4 】

上記第 1 の領域 1 0 2 における多重散乱は、ランダムではあるがスタティックな過程であり、第 1 の領域 1 0 2 と第 2 の領域 1 0 4 との境界面上での空間的コヒーレンス度の分布は、半導体レーザ本来の放射強度の角度分布と第 1 の領域 1 0 2 の構成要素(母材と散乱材の組み合わせ)およびその各部ディメンジョン(寸法)等を反映する。上記スポット 1 0 5 は、アイセーフティの観点から問題とならぬように、スポット 1 0 5 全体として見ればグローバルに空間的コヒーレンシを喪失している。また、上記スポット 1 0 5 は、ほぼ均一な近視野像を有する 2 次的な面光源と見なし得るように、第 1 の領域 1 0 2 と第 2 の領域 1 0 4 との境界面上に拡大鏡としてのレンズ部 1 0 4 a の径よりも小さい有限の広がりを持って形成される。上記第 1 の領域 1 0 2 での多重散乱の結果、上記 2 次的面光源の各要素からあらゆる方向に放射される光束は、それ自身のファーフールド(far-field; 遠視野)としては、ほぼ完全ランバーシアン(Lambertian)のように振る舞う。

【 0 0 9 5 】

上記 2 次的面光源からの散乱光が入射する上記第 2 の領域 1 0 4 は、少なくとも、上記スポット 1 0 5 の主要な部分(例えばピーク強度の $1/e^2$ 以上の強度を有する領域)に対して拡大鏡として作用するように、自由空間と境界面間の距離および境界面形状を各媒質の屈折率をもとに定めた光軸 1 0 6 を有するレンズ部 1 0 4 a を備える。自由空間側から光源素子(半導体レーザ)を観察する場合にスポット 1 0 5 の正立虚像が形成され、スポット 1 0 5 からの出力光が第 2 の領域 1 0 4 内において低角で交差する確率を低減すべく、レンズ部 1 0 4 a の光源側

の焦点が上記境界面よりも光源素子(半導体レーザ)側に配置される。また、この発明で想定する用途においては、上記虚像の歪についてはほとんど考慮する必要はない。

【 0 0 9 6 】

このように、この発明の光源装置は、半導体レーザからの誘導放出光が多重散乱光学系を介して自由空間に放出される光源装置であって、上記多重散乱光学系は、半導体レーザに近接する第1の領域102とその第1の領域102に接して自由空間に至る第2の領域104からなり、上記第1の領域102と第2の領域104のうちの少なくとも第1の領域102に第2の領域104よりも散乱体を高濃度に含み、上記第2の領域104が第1,第2の領域102,104間の境界面に形成される2次的な面光源の少なくとも主要部分に対する拡大鏡を有するように構成される。典型的には、第1の領域102の光軸方向の厚みは1mm~3mm程度、第2の領域104の光軸方向の厚みは、上記レンズ部104aの形状に依存して2mm~10mm程度の範囲が想定される。また、図1はこの発明が対象とする光学系の概要を説明するための概念図であり、散乱体や全体のデimension(寸法)等、各部のパラメータ詳細については、後述する種々の具体的な数値が適用される。

【 0 0 9 7 】

図1では、上記第1の領域102が平板状の構成のアイセーフ光源装置を示したが、面内方向には、第1の領域102の形状をスポット105程度の広がり限定する構成要素を備えていない。例えば、樹脂基板上に搭載した半導体レーザの周りに、想定されるスポットサイズよりも大きい広がりを持つ棒体を設け、この中に散乱体を分散した液状やゲル状またはゴム状の物質を滴下するなどして、容易に平板状の第1の領域を形成することができる。しかし、このような構成では、近接して他の機能を有する素子等を配置することができず、面方向の小型化が難しくなる。送受信可能なモジュールとして組み合わせるフォトダイオード等の受光素子直上にも上記第1の領域が形成されると集光効率の低下が発生し得ることから、光源部と隣接して配置することを避ける必要が生じる。

【 0 0 9 8 】

以下、この発明の光源装置としてのアイセーフ光源装置およびそれを用いた光通信モジュールを図示の実施の形態により詳細に説明する。

【 0 0 9 9 】

(第 1 実施形態)

図 1 とは異なり、半導体レーザチップの周辺のみ、散乱体を分散した比較的高い粘性を有する適量の物質を直接滴下して、第 1 の領域としての十分な厚みおよび面内広がりを持たせることもできる。

【 0 1 0 0 】

図 2 はこの発明の第 1 実施形態の光源装置としてのアイセーフ光源装置の構成を示す断面図である。

【 0 1 0 1 】

図 2 に示すように、半導体レーザ 2 0 0 は、サブマウント 2 0 2 にダイボンドおよびワイヤボンドされ(詳細は図示せず)、このサブマウント 2 0 2 を介して樹脂基板 2 0 3 上に搭載されている。上記半導体レーザ 2 0 0 の光軸 2 0 1 は、第 2 の領域 2 0 5 の拡大鏡としてのレンズ部 2 0 5 a の光軸 2 0 6 と略一致している。上記半導体レーザ 2 0 0 のサブマウン 2 0 2 への搭載後、散乱体を高濃度分散し硬化材を比較的多めに配合した 3 0 0 0 0 c P (3 0 P a · s) と高粘度のペースト状シリコンゲルを、半導体レーザ 2 0 0 が搭載されたサブマウン 2 0 2 を覆うように滴下する。そして、1 5 0 ℃ 1 時間のゲル硬化工程を経て、図 2 に示すような第 1 の領域 2 0 4 を形成する。その後、一般的な熱硬化型エポキシ樹脂のトランスファーモールド工程を経て、第 2 の領域 2 0 5 によってアイセーフ光源装置として封止され、第 1 , 第 2 の領域 2 0 4 , 2 0 5 からなる多重散乱光学系が完成する。なお、上記樹脂基板 2 0 3 を用いる場合のみならず、サブマウントを介さずにリードフレームを用いて上記アイセーフ光源装置の構成の変形例を得ることは容易である。

【 0 1 0 2 】

ここで、上記第 1 の領域 2 0 4 の母材として、ゲル状またはゴム状物質以外を用いると、この発明の多重散乱光学系を構成することが困難な例について説明する。例えば、粘性の低いシリコンオイルに微粒子を単分散することは比較的容

易であるが、シリコンオイルは硬化させることができないため、第1の領域としてのディメンジョンを確定することができない。また、分散した散乱体が沈降し散乱特性が経時変化する。また、何らかの枠体を用いてオイルを保持しても、第2の領域を形成するトランスファーモールド工程でその大部分が流出してしまったり、熱硬化の間に変質したりする。

【0103】

この第1実施形態のアイセーフ光源装置では、樹脂基板203の表面から第1の領域204頂上部までの厚みとしては1mm～4mm程度まで変化させることができる。また、このアイセーフ光源装置では、樹脂基板203表面から第2の領域205のレンズ部205a頂上までの距離を4.0mm、レンズ部205aの半径を2.0mmとしている。第1の領域204の散乱体としては後述する種々の材料系による微粒子を用い、作製するモジュール(アイセーフ光源装置)毎に、サイズパラメータ q が0.05～50の範囲内で微粒子粒径の最頻値 D_s を変化させ、また母材との屈折率差 Δn も0.02～1以上にわたって変化させた。ここで、サイズパラメータ q は、

$$q = (2\pi/\lambda) \cdot (D_s/2)$$

(ただし、 D_s は散乱体の粒径最頻値、 λ はここでは半導体レーザのシリコンゲル中での発振波長)

で表される。また、分散濃度は、真比重による換算において0.01vol%～50vol%の範囲内で変化させた。このように、散乱特性の異なる第1の領域204を含む多数のアイセーフ光源装置について、そのスペックル量を評価した。

【0104】

ここで、微粒子粉体およびその分散工程について詳細に説明する。上記サイズパラメータ q の範囲で特定の粒度分布最頻値 D_s を有する粉体をそれぞれ用意する。典型的には、散乱体となる粒径が制御された微粒子(1次粒子)の集合体(凝集体)が多量の空気を含んだ形態で乾燥粉体として供給される。この発明における第1の領域に分散される粉体としてより好ましいのは、上記粉体の製造工程において、一旦1次粒子にまで微細化された状態で、分散母材(第1の領域の母材)

への分散を容易化するための適切な表面処理を行い、その表面エネルギーを減少させたものである。

【0105】

上記粉体を高濃度に母材に分散する場合、典型的には以下のような2段階の分散工程を行うことで最も好ましい分散体を得られる。まず、分散体のマスターバッチとして粉体重量比70%~90%以上の高濃度で固練りする。この過程で、上記乾燥粉体に含まれる凝集体を効果的に粉碎する。さらに連続的に、含有空気を母材に置換しながら粉体を濡れさせる過程と、母材に混入・分散させる混練過程を経て、1次粒子が均質に分配された状態に至らしめることが可能になる。この一連の工程には、通常、1軸または2軸のスクリュウ押出機やニーダ(kneader)、あるいはホモジェナイザー(homogenizer)等、比較的大型で強い剪断力を印加し得る混練機が用いられる。

【0106】

次に、上記マスターバッチを分散母材で希釈しながら混練(または混合・攪拌)を行い、所望の散乱体濃度の分散体を得ることができる。この希釈工程においては、小型のニーダやブレードを用いる混練ミキサー、または小型のホモジェナイザーやビーズミル、容器回転型のデスクトップミキサー等の比較的簡易な型式の混練機を用いても、凝集体を含まない良好な分散体を任意の濃度で作製することが可能となる。特に希釈を主目的とする場合には、気泡の発生が抑制される高速容器回転型のミキサーが好ましい。

【0107】

上記アイセーフ光源装置を試作した粉体のパラメータ範囲は、上記2段階の分散工程によって好ましい分散体を得られる範囲のみならず、たとえ上記表面処理を行った1次粒子粉体であっても、分散機の性能上、アグロメレート(凝集物)やクラスタの形成が避けられないような極端に高濃度な範囲または極端に小さい粒径範囲をも含んでいる。これらを総合的に評価することで、実際に容易に製造可能な多重散乱光学系の構成を抽出することができる。

【0108】

図3(a)は、上記種々のアイセーフ光源装置における近視野像の観測結果から

得られた半値全幅とスペックル量の関係を示している。図3(b)~(d)にはスペックルが顕著なデータ点における測定例と解析例を示し、図3(e)~(g)には十分に低減されたデータ点における測定例と解析例を示している。これらの近視野像は、多重散乱系の外部からCCDカメラ(分解能約 $4\mu\text{m}$)によって上記第1の領域と第2の領域の境界面上に形成される2次的な面光源を観察し、その光強度分布を光軸にほぼ垂直な方向(X)に走査して得られたものである。なお、図3(b)では、生データの曲線と平均強度分布の曲線とが重なりあって見にくい、滑らかな曲線の方が平均強度分布である。

【0109】

詳しくは後述するが、図3(b),(e)において、FWHMは平均半値全幅、 σ_{NFP} は平均強度分布からの残差に基づくスペックル量を示している。また、図3(c),(f)において、 σ_{PAR} はPAR(Peak-to-Average Ratio)に基づくスペックル量を示している。

【0110】

ここで用いるCCDカメラの分解能は、上記典型的な眼球の固視微動量よりも高い必要があるが、桁違いに高分解とすることはアイセーフティの考慮に対して有意義ではない。仮に、 $1\mu\text{m}$ の発振波長のレーザ素子を用いた多重散乱光学系の近視野像に $0.5\mu\text{m}$ (半波長)程度のサイズを有する鋭いスペックル構造が顕著に存在するならば、その局所領域においては互いに逆方向から交差する光路が大勢を占め、光路がある面内に偏って存在していることを意味する。このような事象は、極めて高次の多重散乱を経た後には確率論的に発生し得ない。また、コヒーレントな干渉パターン自体から半波長よりも微細な構造が発生することもあり得ない。したがって、この発明が対象とする多重散乱光学系のアイセーフティ評価においては、通常のCCDが有する $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 程度の分解能を用いて行うのは適当な選択である。

【0111】

スペックルに関して定量評価を行うために、図3(a)の縦軸の値、すなわち近視野像のスペックル量として、 σ_{PAR} (または σ_{NFP})を定義することができる。まず、XY面(CCD撮像面)上において、ある $Y=Y_j$ でX方向に走査した離散化

1次元光強度分布 $I(X_i; Y=Y_j)$ を規格化する ($1 \leq i \leq N$)。次に、 $I(X_i; Y=Y_j)$ に対して、例えば多項式近似によるスムージング処理を行った滑らかな空間分布 $J(X_i; Y=Y_j)$ を求める。さらに、この仮想的にスペckルを平均化した平均値曲線 $J(X_i; Y=Y_j)$ に対して、各測定点 X_i での残差 $\rho_i = I(X_i; Y=Y_j) - J(X_i; Y=Y_j)$ を全 N 点に対して求める。各測定点 X_i での残差 ρ_i の標準偏差 σ_{NFP} は以下のように表される。

【0112】

【数2】

$$\sigma_{NFP} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\rho_i|^2 - \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i \right|^2}$$

なお、各測定点 X_i での残差 ρ_i の空間軸 (X 方向) にわたる期待値は 0 である。また、上記 $I(X_i; Y=Y_j)$ の $J(X_i; Y=Y_j)$ に対する比 $I(X_i; Y=Y_j) / J(X_i; Y=Y_j)$ 、すなわち対平均値曲線、PAR (Peak-to-Average Ratio) の標準偏差 σ_{PAR} が以下のように求められる。

【0113】

【数3】

$$\sigma_{PAR} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{I(X_i; Y=Y_j)}{J(X_i; Y=Y_j)} \right|^2 - \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I(X_i; Y=Y_j)}{J(X_i; Y=Y_j)} \right|^2}$$

なお、PAR の空間軸 (X 方向) にわたる期待値は 1 である。

【0114】

ここで、上記平均値曲線 $J(X_i, Y=Y_j)$ の導出方法としては、上記 $I(X_i; Y=Y_j)$ に隣接する複数の平行な走査像 $I(X_i; Y=Y_k)$; $k = j \pm 1, 2, 3, \dots$ を各 X_i において平均化したり、2次元での各点 (X_i, Y_i) から一定半径内にあるデータ点すべての平均値を用いることもできる。このような平均化操作は、個々の測定点 X_i に対して、少なくともスペckルの相関サイズ程度の広がりを含んで統計的に十分なデータ点数を用い、かつ、近視野像全体の形状または大きさの影響を受けない程度の範囲内のデータ点のみに制限して行う。この操作を $I(X_i; Y=Y_j)$ 全体にスライドさせて行うことで平均値曲線 $J(X_i; Y=Y_j)$ が得られる。

【0115】

上記平均化手法のうち、特に複数の周辺データ点またはデータ列を平均化する手法は、半導体レーザ表面からのワイヤボンドの影がある場合等、多項式で表現できない不連続な変化を含む像に対してより望ましい方法となり得る。また、同等の多数のサンプルからアンサンプル平均を取ることにもできる。また、平均値曲線 $J(X_i; Y=Y_j)$ のピーク強度から $1/e^2$ 以上、 $1/e$ 以上、または、半値以上の強度を有する範囲内に限定して $I(X_i; Y=Y_j)$ のスペックル量を評価するといった工夫により、上記平均値曲線 $J(X_i; Y=Y_j)$ の分布形状が全く異なる種々の多重散乱光学系を系統的に評価することも可能になる。

【0116】

特に、確実にアイセーフティを考慮するための評価方法としては、以下で説明するように、上記 PAR の振幅の確率分布およびその偏差 σ_{PAR} を指標とすることが好ましい。図 3 (c), (d), (f), (g) には、対応する PAR とその振幅ヒストグラムも示している。

【0117】

上記多重散乱光学系の構成で、スペックルが比較的良好に低減されるパラメータの領域においては、スペックルの空間構造が典型的固視微動量 (数 $10 \mu m$) よりも小さい程度にまで微細化されると共に、上記 PAR の振幅の生起確率はガウス分布を示すようになる。典型的には、PAR は期待値 1 を中心として約 ± 0.06 以内のみに出現する。図 3 (f) では、PAR は 1 ± 0.03 以内程度である。同図から分かるように、上記有限の分解能を有する CCD でスペックル量を評価する場合、PAR 振幅の生起確率が 0 となる上限値 PAR_{max} が容易に見出される。また、いわゆる偏差 σ_{PAR} を、PAR 振幅分布から直接に、またはそれをガウシアンフィッティングして求めることもできる。

【0118】

上記 PAR_{max} またはスペックル量 σ_{PAR} を用いることによって、以下のようにアイセーフティが確保される。すなわち、観測される残留スペックルの構造単位 (微小スポットのサイズ) の詳細とは無関係に、光強度の擾乱による単位面積あたりのパワー／エネルギー増分の最大値を考えることができる。例えば、 PAR_{ma}

$x=0.06$ であれば、同じアイセーフ光源装置を多数個製造して任意に抽出されるサンプルにおいてもまた、近視野像におけるPARの最大値は+6%程度となる。スペックル量 σ_{PAR} を用いる場合も同様に考えることができる。上記アイセーフ光源装置が有するアパレントな光源サイズ、発振波長、放射強度の角度分布等の光学的諸特性から、スペックルが全く存在しないとした場合のAEL(許容被爆限界)または光出力上限Pは、国際安全規格等に従って決定することができる。さらに、マージン α を用いて、上記アイセーフ光源装置に対する光出力の上限値 P_{LIM} を、

$$P_{LIM} = P / (1 + PAR_{max} + \alpha)$$

と設定する。例えば $\alpha = 4\%$ とすれば、光出力の上限値 P_{LIM} はPの約90%であり、製品の仕様として出力上限値は P_{LIM} 以下とされる。

【0119】

この発明で開示される多重散乱光学系の構成においては、製造工程の再現性や経時変化を見込んで、上記マージン α が略10%以下程度となるように、簡便な構成要素および製造工程が採用され得る。また、通常の工程管理や品質管理と同様に、 $3\sigma_{PAR} \sim 6\sigma_{PAR}$ によって上記出力上限の仕様値や良品選別等を行うこともできる。 PAR_{max} と σ_{PAR} の関係について、上記多重散乱光学系の構成のみならず、あらゆるこの発明の開示の構成について統計を取った結果、その平均値 $\langle PAR_{max} \rangle$ は約 $3\sigma_{PAR}$ 、その最大値 $\max\{PAR_{max}\}$ は約 $5\sigma_{PAR}$ であった。

【0120】

このように、 PAR_{max} 等からマージンを設定して、光源装置としてアイセーフ半導体レーザモジュールの設計および製造にあたることは十分に合理的である。クラス1レベルのアイセーフを確保するためのスペックル上限値として、典型的には σ_{PAR} を3%~8%程度の小さい値とすることは良い目安となる。また、上記スペックル量 σ_{NFP} と σ_{PAR} の関係は、近視野像の全体的形状または全幅に依存する正の相関を持ち、多重散乱光学系の各部パラメータの変更に対して同様の挙動を示している。したがって、スペックル量 σ_{NFP} によって多重散乱光学系を検証し、製造工程を管理することもできる。

【0121】

また、アイセーフティに対する別の考え方を元にした評価を行うことも可能である。通常、インコヒーレント光源に対しては、そのアパレントサイズは全光強度の63% ($=1 - 1/e$) を含む領域のサイズとして定義される。これに対してスペックルを含む光源の場合には、例えばピーク強度の $1/e$ を下回るスペックル擾乱を含まない確率が99.9999%となるスペックル偏差の上限値を σ_{LIM} ($\geq \sigma_{PAR}$) とすれば、ガウス分布の積分値を考慮して光出力の上限値 $\sigma_{LIM} = 0.09$ なる値を設定することができる。ここまでにいくつかの例を示したように、アイセーフティに対する何らかのモデルに基づいた光源近視野像への要求を、 P_{AR} の統計量に還元して実際の製造工程または製品の品質管理を行い、クラス1レベルのアイセーフティを確保することができる。勿論、製造工程の安定性等から安全率が不十分と判断される場合は、より厳しく $6\sigma_{PAR}$ に対するマージンを満足するように、光源サイズを拡大する多重散乱光学系の再設計を行ったり、上記マージン α を増大して、光出力の上限値 P_{LIM} を制限する等の対応によって、確実にクラス1のアイセーフティを保証する製品を製造することが可能である。

【0122】

図3(a)に示したデータは簡単のために、分散母材をシリコーンゲルとし、散乱体は、 SiO_2 (×: 屈折率差 Δn の絶対値は約0.02)、アクリル系ポリマー(Δ : 屈折率差 Δn の絶対値は約0.09)、スチレン系ポリマー(●: 屈折率差 Δn の絶対値は約0.19)、 TiO_2 (□: 屈折率差 Δn の絶対値は約0.9)をそれぞれ単体で用いた検討結果のみを含めている。ここで、図3(a)の横軸は近視野像の半値全幅であるが、これを変化させるパラメータは、硬化後のシリコーンゲル(図2に示す204)の高さ、各散乱体の粒径、屈折率および分散濃度である。図3(a)に示すように、全体的な傾向としては、シリコーンゲルの高さを稼ぎ、散乱体の小粒径化/高濃度化することで、平均散乱回数または輸送平均散乱回数が増すとスペックルが減少する。個々のデータを逐一对比させた詳細な説明は省略するが、以下のことが明らかとなった。

【0123】

同一の散乱体に対して、粒径 D_s の分布から、平均散乱回数 (= 幾何学的ディ

メンジョン L / 輸送平均自由行程 l_{AVE} が数 10 回～数 100 回程度となる第 1 の領域の光軸方向の厚みおよびフィラーの組み合わせに対して、クラス 1 レベルのアイセーフティが得られる多重散乱光学系を構成することが可能である。また、すべての散乱体に対して、分散濃度が 1 vol %、特に 0.1 vol % よりも希薄な場合、逆に 30 vol % を大幅に上回る場合のいずれにおいても、十分にスペックルを低減する効果は得られない。特に、分散濃度が 30 vol % 以上では、光源サイズ自体は拡大されるものの、スペックルとしては増大する傾向がある。さらに、比較的屈折率差の大きい金属酸化物 (TiO_2 等) であっても、粒径最頻値 D_s またはそのサイズパラメータ q が 20 以上の場合には、全分散濃度範囲で十分にスペックルを低減することはできない。また、上記サイズパラメータ q が 1 を下回る場合には、隠蔽力が強く外部への光取り出し効率が低下する傾向があると共に、単分散自体も極めて困難で散乱特性の制御が難しい。また、極めて屈折率差の小さい SiO_2 においては、数 mm 以内の光軸方向の厚みでアイセーフティが得られる多重散乱光学系を構築することは困難である。

【0124】

このようにして、図 2 の多重散乱光学系の構成に対して、第 1 の領域に主として分散される散乱体のサイズパラメータ q が略 1 ～ 15 の範囲にあって、散乱振幅の不均斉が小さくかつ後方散乱成分も顕著ではない領域とすることが望ましいことが見出された。さらに、第 1 の領域の母材との屈折率差として、 $\Delta n \geq 0.15$ 程度の散乱体を用い、屈折率差 Δn とサイズパラメータ q との積 $\Delta n \cdot q$ が略 2 ～ 8 の範囲 (特に 3 近傍) となるようサイズパラメータ q を設定することにより、散乱振幅の不均斉を小さくし散乱断面積を最大化して、より短い幾何学的距離 (多重散乱がない場合の光路長) 内で十分な多重散乱を発生させることができた。

【0125】

ここで、この発明において散乱体を選択するときには、用いる半導体レーザの発振波長に対して、上記のような望ましい屈折率差 Δn の関係が満たされるべきことは言うまでもない。しかしながら、各種粉体材料の諸元として容易に入手可能なナトリウム D 線 (約 589 nm) に対する屈折率を選択の基準としても大きな

問題は生じない。この発明の散乱体として適切な材料は、バンドギャップ波長がレーザ発振波長よりも十分短くレーザ光を吸収しないものであって、可視域(上記 589 nm)を吸収しない材料をこの発明の散乱体として近赤外域で使用する場合には、同じ正常分散領域内での屈折率差 Δn として大きな誤差を生じることはない。

【0126】

また、上記諸条件を満たす散乱体に対して、特に最近接散乱体間の平均距離がパラメータ D_s の20倍以内となることを目安とすることにより、実用的かつ簡易に分散工程を実行することが可能であることが見出された。ここで、この発明における粒径の最頻値 D_s なるパラメータは、粒子が単分散される場合、複数の粒径分布を持つ粒子種が混合分散される場合、さらに2次粒子またはフラクタルクラスタ等の凝集体が生じている場合や、これらが多分散する場合等、いずれの状況に対しても、それら個々の粒子種に対して適用されるべきものである。ある外径を有するが内部に空隙を有するような凝集体を含む分散系に対しては、凝集体の外径そのものを考慮して最頻値 D_s を求め、それに対するサイズパラメータ q が上記略1～15の範囲を満たすことが望ましい。同じ外径サイズの凝集体であれば、波長と比べ十分に小さく、かつ、より小粒径の1次粒子からなるものの方が、凝集体の散乱振幅に微細構造が現れにくくなり、スペックル低減に対して良好な結果を得ることができる。

【0127】

また、体積比による分散濃度は必ずしも完全な定義付けにならないことがある。母材(ゲルまたはゴムまたはエラストマー)への単分散が得難く2次粒子として凝集した場合や、吸油量の影響が大きい場合等がこれに相当する。2次粒子として凝集する前者については、凝集体間についても、その外径が既に述べた望ましい範囲にあるならば、上記平均最近接距離の関係がそのまま望ましい条件と考えてよい。一方、吸油量の影響が大きい後者については、十分な分散工程後(体積減少がほとんどなくなった後)、散乱体自体(結晶体)の比重(真比重)を用いて換算した体積比が、略1 vol %～30 vol %程度の範囲であれば、良好な多重散乱領域を構成することが可能である。乾燥粉体の諸元として通常使用される見

かけ比重(空隙部分の空気を含む見かけ上の比重)によって分散仕込み量を決定する場合、真比重による平均最近接距離の推定値との誤差が生じる。しかしながら、分散および硬化処理後に、実際に共焦点レーザー顕微鏡等で観察して散乱体間距離が平均粒径 D_s の20倍以内程度であることを確認するのは困難なことではない。したがって、製造工程を調整して上記の望ましい分散濃度を見出すことが可能である。なお、気泡の脱気工程等、実際の分散工程上の注意および工夫が、上記第1の領域の散乱特性を制御するために重要となる場合があることは言うまでもない。

【0128】

ここで、第1の領域の母材として、ゲル状またはゴム状物質以外を用いると、この発明の多重散乱光学系を構成することが困難な他の例を説明する。例えば、上記母材としてエポキシ樹脂を用いることも考えられる。シリコン系のゲルやエラストマーと比較すると、微粒子の分散は比較的容易であるものの、ナトリウムD線に対する屈折率は一般的に1.53以上程度と高い。したがって、先に列挙した種々の散乱体のうち、一般的な有機系微粒子として取り上げたアクリル系、スチレン系のいずれの微粒子に対しても屈折率差 Δn の絶対値が0.05以下程度となり、第1の領域の母材にエポキシ樹脂を適用した場合、屈折率差不足から望ましい散乱特性を得ることができない(図3(a)の SiO_2 と同レベル)。一方で、有機系微粒子は、低コスト化や大粒径化が容易であると共に、後述の比較的大粒径の散乱体が有効なこの発明の多重散乱光学系の構成において、これらの有機微粒子が極めて有効である。しかしながら、多重散乱光学系の構成を選択する乃至は最適化する段階で複数の母材を使い分けることは、実際の製造工程において極めて非効率的であり、この発明の多重散乱光学系第1の領域の母材として最も好ましいとは言い難い。

【0129】

図2に示したアイセーフ光源装置の構成は、上記比較的小粒径の散乱体の高濃度分散が可能な母材と混練装置の組み合わせが利用可能な場合、または、比較的小型化に対する要求が緩いアイセーフ光源装置を製造する場合に好ましく用いられる。一方、図2に示すアイセーフ光源装置のような構成によれば、その製造工

程は簡便であるものの、第1の領域の光軸方向への厚さや上記2次的面光源のサイズの制御が難しく、特に効率よく上記2次的面光源のサイズを広げることが比較的難しい。また、第1の領域を構成する母材物質の流動性を高め、高濃度分散後のハンドリングを容易にしようとする場合、第1の領域の形状や散乱体濃度が制御し難く、製造歩留まりの問題が生じ得る。したがって、光出力の要求仕様が高く、AEL(許容被爆限界)に対してマージンが大きく取れないアイセーフ光源装置を設計・製造する場合には採用し難い場合がある。そこで、このような問題を解決する構成のアイセーフ光源装置を次の第2実施形態において説明する。

【0130】

(第2実施形態)

図4はこの発明の第2実施形態の光源装置としてのアイセーフ光源装置の構成を示す断面図である。図4において、上記第1実施形態の図2に示すアイセーフ光源装置と同一の構成部は同一参照番号を付している。

【0131】

図4に示すように、半導体レーザ200を樹脂基板203上にサブマウント202を介して縦置きした後、半導体レーザ200が搭載されたサブマウント202を取り囲むように、円筒400(内径1.1mm、高さh=2mm)を銀ペーストによって固着する。このように、上記円筒400の内側の壁面とし樹脂基板203表面側を底面とする凹部210を形成している。上記円筒400の内周面にAuメッキにより金属層401を形成している。上記樹脂基板203上にAuメッキ配線パターン402を形成している。上記円筒400の金属層401および樹脂基板203上のAuメッキ配線パターン402によって、凹部210の最表面の主要な部分が金属層となっている。

【0132】

さらに、第1の領域204であるシリコーンゲルを母材とする分散体が、上記凹部210に注入されてその形状が確定し、その後のゲル硬化工程によって上記形状およびその散乱特性が良好に保持される。図4に模式的に示すように、多重散乱によって拡散しつつ第2の領域205の拡大鏡としてのレンズ部205aの光軸方向206へと進行するレーザ光は、上記凹部210の壁面に達すると反射

され、散乱光は第1の領域204に閉じ込められつつ全体として第2の領域205に進行する。上記凹部210の最表面における主要な部分とは、この3次元的な拡散領域に接する面を意味している。このような構成とすることにより、図4においては、上記円筒400の開口部が第1の領域204からの光の散逸口となって、十分な多重散乱を受けたレーザ光が第2の領域205に導かれる。この結果、円筒400の開口部近傍に存在する第1の領域204と第2の領域205の境界面上に、上記凹部210の開口と類似した形状を有する2次的面光源が形成される。上記第1の領域204と第2の領域205で多重散乱光学系を構成している。

【0133】

図4の構成において、上記円筒400の高さ h を種々に変更すると共に、図3と同様、散乱体パラメータと濃度を広範囲にわたって変化させて得られる多数のアイセーフ光源装置に対して近視野像のスペックル量 σ_{PAR} を評価した結果を図5(a)に示している。また、図5(b),(c),(d)には良好な近視野像、PARおよびPARのヒストグラムを示している。近視野像の2次元形状は、上記円筒400(図4に示す)の断面形状を反映して裾部分の切れがよくなっている。したがって、光源サイズを明確に規定することができ、製造時の再現性が格段に向上するため、アイセーフ光源装置を歩留まりよく低コストで製造できる。また、第1の領域の幾何学長が図2に示す光源装置とほぼ同じ値であっても、多重散乱領域が最表面を金属層とする凹部210によって取り囲まれていることによって、より効果的にスペックルを低減することが可能になる。

【0134】

図5(a)においては、図3(a)と異なり、横軸に輸送平均散乱回数 L/l_{AVE} を取っている。上記構成では、図4に示す第1の領域204の光軸206方向の厚み L を明確に測定することができるため、図5に示すように、より総合的な評価が可能になる。散乱体パラメータからミー(Mie)散乱理論に従い散乱断面積および不均斉因子 g を求め、分散濃度から輸送平均自由工程 l_{AVE} を算出することができる。図5(a)から、図3(a)でも見られた特徴がより一般的な傾向として散乱体種に依存せずに観測された。すなわち、高出力半導体レーザに接し、これを取

り囲むように設けられる多重散乱領域である第1の領域において、輸送平均散乱回数が数10回を超えると、クラス1レベルのアイセーフティを満足するレベルまでスペックルが低減された近視野像を得ることができるようになる。

【0135】

しかしながら、上記右下がりの傾向を追求すると、散乱体自体のパラメータ(屈折率差と粒径)を変更し得る範囲にはおのずと制約があり、結局、分散濃度を例えば30vol%~50vol%に高濃度化せざるを得ない。このような高濃度領域では、いずれの散乱体においても、かえってスペックルが増大する傾向が明白に観測された。このときの分散ゲルを光学顕微鏡で観察すると、大部分の散乱体が互いに接触してクラスタ化しているのが見出される場合が多い。上記スペックルが再び増大に転じる輸送平均散乱回数 L/l_{AVE} の上限値は、各散乱体の幾何学的断面積で規格化した散乱断面積(すなわち主として屈折率差 Δn)に応じて異なるものの、この発明で想定する各部のディメンジョンに対して、数100回以上の多重散乱を好ましく発生させるような多重散乱領域を安定して得ることは困難であることが見出された。

【0136】

この発明の多重散乱光学系として、特に図1や図2または図4のように幾何学的光路長が明確に定義できる光学系の構成に対して好ましく適用される散乱体種は、図3や図5に示したものに限定される必要はない。例えば、シリコーンゲル(ナトリウムD線に対する屈折率約1.40)を母材とする場合、スチレン系架橋型ポリマー(同1.59)や TiO_2 (同2.6)に加えて、 CeO_2 や ZrO_2 (同2.3)も特に好適に用いられる。または ZnO (同2.0)、 Al_2O_3 (1.77)等の金属酸化物、 $Al(OH)_3$ (同1.6)等の水酸化物、または、各種ガラスビーズ(同約1.5~1.6程度)も好ましく用いることができる。さらに各種材料を外殻とする中空微粒子(同1.0)や、顔料に使用される炭酸カルシウム(同1.6)、そのほか各種鉱物も着色剤等のうちレーザ光を吸収しないものであれば利用可能である。また、シリコーンゲル以外の特殊な母材の例として、硬化条件に応じて真球状の空隙や気泡(同1.0)を発生する紫外線硬化型の樹脂材料が挙げられる。また、上記種々の微粒子の形状は必ずしも真球状でなくてもよく、各ディメンジョン(

寸法)を平均化して最頻値 D_s を求めても概ね良好に多重散乱光学系を構成することができる。

【0137】

ところで、上記第1実施形態の図2およびこの第2実施形態の図4を用いて説明したアイセーフ光源装置では、半導体レーザとして発振波長890nmのInGaAs/AlGaAs系構造を有するものを用いている。すなわち、通常のCD-R/RW用向け780nm帯AlGaAs系レーザの活性層井戸層をInGaAs歪量子井戸層に変更したものである。図3または図5に示した種々モジュール状態で、多重散乱後の誘導放出光が示す波長スペクトルと、半導体レーザ単体で測定される波長スペクトルには、CW(Continuous Wave; 連続波)動作でも有意な差が生じていることが分かった。特に、体積比1vol%~30vol%程度の良好なコヒーレンシ低減効果が得られる比較的高濃度の分散を行ったモジュールで、高出力動作時の縦モード間競合状態が単体レーザの場合と比べて顕著に観測された。この発明の構成においては、多重散乱光学系の第1の領域が半導体レーザに近接し、かつ取り囲むように形成されるため、多重散乱によって生じるコヒーレント後方散乱ピーク成分が、いわゆる戻り光として半導体レーザの出力端面にフィードバックされる。この戻り光によってスペクトル線幅の増大効果やモード競合が誘起される効果が生じるものと推測され(後述)、この発明の多重散乱光学系の著しい特徴と言える。

【0138】

ここで、上記第1の領域が半導体レーザに近接するということについて説明する。上記第1の領域は、必ずしも半導体レーザに直接接する必要はなく、半導体レーザと第1の領域の間に、空隙領域または第1の領域としての散乱作用を有しない層が挟まれても構わない。例えば、半導体レーザと第1の領域の母材材料の濡れ性がよくない場合には境界に空隙部分が生じ得る。また、半導体レーザの端面に施される単層または多層の誘電体膜コーティングが、通常の波長の数倍程度の厚みではなく、波長の数10倍以上にまで厚く形成される場合にも、半導体レーザと第1の領域との間に空隙が生じ得る。また、意図的に半導体レーザと上記第1の領域の接触を避け、散乱体がレーザ端面に密着することを避けたい場合も

あり得る。このような場合に、典型的には、半導体レーザチップの端面と上記第1の領域が1mm以内程度の距離で近接していれば十分に第1の領域としての諸作用を得ることができる。あるいはまた、上記コヒーレント後方散乱ピークがレーザ光出力端面にフィードバックされ、戻り光として作用する程度に近接して配置されることが望ましい場合には、半導体レーザチップの単面と上記第1の領域が数 μm ～数100 μm 以内の距離で近接していれば、上記戻り光の作用を得られる。あるいはまた、上記第1の領域としての散乱体とは異なり、微小なマイクロハーフミラーあるいはマイクロレンズとして、個別には幾何光学的に振る舞うような比較的大きな粉体を含んだ領域を、半導体レーザと第1の領域の間に介在させても良い。すなわち、レーザからの光束をより効果的に空間的に広げ、その後第1の領域において分割された各光束が多重散乱を経るように光学系を構成することができる。このような構成によれば、スペックル低減及びアパレントな光源サイズの拡大がさらに容易になる。ここに示した複数の例のように、半導体レーザと第1の領域は必ずしも直接接して設けられる必要はない。

【0139】

図2または図4の構成のアイセーフ光源装置においては、多重散乱光学系の全体としての厚み、すなわち光軸方向のディメンジョンは、典型的に4mm以上程度必要であった。勿論、図2における樹脂基板203にざぐり穴を設け、図4の凹部210と同様の作用を得て、光学系全体としての厚みを低減することは可能である。また、ざぐり穴と上記円筒を組み合わせた複合的な凹部を用いることもできる。

【0140】

しかしながら、図1、図2または図4の構成例では、多重散乱光学系の薄型化に対する格段の作用を有する訳ではないので、極めて小型のアイセーフ光源装置を得たい場合、アパレントな光源サイズを十分拡大できずに光出力の上限値を限定せざるを得ない状況も起こり得る。そこで、このような問題を解決し、より有効に機能するアイセーフ光源装置を次の第3実施形態において説明する。

【0141】

(第3実施形態)

図 6 (a)はこの発明の第 3 実施形態の光源装置としてのアイセーフ光源装置の構成を示す断面図であり、図 6 (b)は半導体レーザの光路を示す概略図であり、図 6 (c)は近視野像の相対光強度分布を示す図である。

【 0 1 4 2 】

この第 3 実施形態のアイセーフ光源装置に用いられる半導体レーザ 6 0 0 は、チップ厚 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、チップ幅 $230\text{ }\mu\text{m}$ 、リッジストライプ幅 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 、共振器長 $500\text{ }\mu\text{m}$ で両端面半波長コーティングのものを利用した。この半導体レーザ 6 0 0 は、発振波長が 890 nm となるように InGaAsMQW 活性層と通常の 780 nm 帯レーザと同じ AlGaAs 系バリア／ガイド／クラッド等の各層が調整されている。なお、端面コーティングを AR/HR から半波長コーティングとして両端面から光出力を得るように変更した点以外は、上記第 1,第 2 実施形態の図 2～図 5 の説明で用いた半導体レーザと全く同じである。このタイプの半導体レーザは、 10 mA 程度の閾値電流と 250 mW を超える COD ($\text{Catastrophic Optical Damage}$; 端面の光学的損傷)レベルが得られ、 Si をディテクタ(受光素子)として用いる低コストな高速ワイヤレス光通信システムのトランシーバの構成として、送信手段の高出力化を図るのに非常に有利な素子である。

【 0 1 4 3 】

図 6 (a)に樹脂基板 6 0 3 の上面に、深さ $350\text{ }\mu\text{m}$ 、共振器方向の長さ $600\text{ }\mu\text{m}$ の平坦部(底面)および傾斜角度約 50° の壁面(斜面)を有する凹部 6 1 0 を形成している。上記樹脂基板 6 0 3 上および凹部 6 1 0 の最表面に Au メッキにより配線パターン 6 1 2 を形成している。上記半導体レーザ 6 0 0 の下面は、凹部 6 1 0 の底面(配線パターン 6 1 2)に銀ペーストを用いてダイボンドされ、半導体レーザ 6 0 0 の上面は他の配線パターン 6 0 8 にワイヤボンドされる(ワイヤ 6 0 2)。

【 0 1 4 4 】

上記アイセーフ光源装置において、好ましい散乱体として、例えば平均粒径 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ (シリコーンゲル中で $q=4$)、粒径精度 CV 値 50% のスチレン系架橋微粒子を用いる。上記スチレン系架橋微粒子を散乱体として $15\text{ wt}\%$ と高濃度に分散させた熱硬化型シリコーンゲルを用いることができる(屈折率差 Δn は略

0.2)。なお、種々の散乱体に関する詳細については後述する。

【0145】

上記シリコーンゲルは、ジメチルポリシロキサンを主成分とし、単体で粘度2000 mPa・s (2000 cP)と比較的高い流動性を有する。このようなシリコーンゲル主材は、ニーダによる散乱体の分散工程後、硬化剤と混合され脱気処理を行った後、5000 mPa・s程度の流動性を保って上記凹部610に注入される。上記凹部610に注入された高濃度分散ゲルは、凹部610によってその形状が確定・保持されたまま、少なくとも180℃・1時間の熱硬化工程を経て、この発明の多重散乱光学系の第1の領域604となる。その後、散乱体を含まない熱硬化型エポキシ樹脂をトランスファーモールドすることによって、上記第1の領域604と接して自由空間に至る第2の領域605が形成され、樹脂基板603の上面全体が一体封止される。上記第2の領域605には、半径1.1 mmの球面的一部分を使って構成される光軸606を有する拡大鏡としてのレンズ部605aが少なくとも含まれている。上記凹部610の底面からレンズ部605aの頂点までの幾何学的距離は1.65 mmである。上記第1の領域604と第2の領域605で多重散乱光学系を構成している。

【0146】

上記構成のアイセーフ光源装置では、半導体レーザー600の両端面からの出射光の光軸601は、第1の領域604と第2の領域605の境界面に至るまでに第2の領域605のレンズ部605aの光軸606と略同じ方向を指向するように、その向きが変換される。

【0147】

さらには、この第3実施形態の図6(a)のアイセーフ光源装置の構成を上記第2実施形態の図4のアイセーフ光源装置の構成と組み合わせるのも好ましい。このような組み合わせのアイセーフ光源装置の構成を図7(a),(c)に2通り示している。

【0148】

図7(a)に示すアイセーフ光源装置では、樹脂基板703に上方に向かって広がる円錐台形状の凹部730を設け、その凹部730内に半導体レーザー700を

配置している。上記樹脂基板703上および凹部730にAuメッキ配線パターン712を形成し、凹部730のAuメッキ配線パターン712上に半導体レーザー700の下側電極(図示せず)を電氣的に接続している。一方、半導体レーザー700の上側電極(図示せず)を、樹脂基板703上かつ凹部730近傍に設けられた電極713にワイヤ702を介して電氣的に接続している。さらに、樹脂基板703上に凹部730を囲うように円筒710を配置している。上記円筒710を樹脂基板703上に銀ペーストによって固着している。さらに、上記円筒710の内壁にAgメッキにより金属層711を形成することにより、内部表面を反射面になっている。

【0149】

上記凹部730の壁面、底面および円筒710の内壁面によって複合的な凹部を形成している。この複合的な凹部に、図6のアイセーフ光源装置と同じ高濃度分散ゲルを満たして、第1の領域704を形成している。そして、上記樹脂基板703上にエポキシ樹脂によるモールドされた第2の領域705を形成している。上記第2の領域705は、拡大鏡としてのレンズ部705aを有している。ここでは、AR/HRコーティングを施した半導体レーザー700片端面からの出力光を利用し、これにあわせて凹部730の壁面を、角度45°で対向させている。

【0150】

一方、図7(c)に示すアイセーフ光源装置は、図7(a)に示すアイセーフ光源装置と異なり、円筒710よりも径の小さい円筒720を用い、凹部730の壁面、底面および円筒720の内壁面によって形成された複合的な凹部に、同様の高濃度分散ゲルを満たして、第1の領域714を形成している。また、電極713は、第1の領域704の外側にあり、この電極713に接続されるワイヤ702の一部が第2の領域705にある。上記円筒720の内壁にAgメッキにより金属層721を形成している。この図7(c)に示すアイセーフ光源装置の構成では、トランスファーモールド時のワイヤ剥がれ、または、上記円筒720とのショート不良が発生し易いが、図7(a)と比べると近視野像の平坦性または対称性が向上する(図7(b),(d)参照)。他の構成要素は図6(a)と同一である。

【0151】

ここで留意すべき構成上のポイントとその著しい効果を説明する。図6(a)または図7(c)のアイセーフ光源装置において、ワイヤ602,702が、第2の領域605,705であるエポキシ樹脂の内部にまで延びている。このように構成することで、万が一、アイセーフ光源装置を使用中にモールド部(第2の領域605,705)が破損・剥離しても、ワイヤ602,702はモールド部とともに引き剥がされて断線するため、半導体レーザ600または700の通電回路はオープン状態となる。すなわち、モールド部のレンズゲインによって光源径が拡大されて安全規格を満足する仕様のアイセーフ光源装置の場合、換言すれば、モールド部が剥離した状態では、光源サイズが安全基準を満たさない大きさのアイセーフ光源装置の場合、半導体レーザ600,700への通電を遮断して、ユーザーを危険な状態に晒すことがない。なお、このようにレンズゲインに頼った設計仕様のアイセーフ光源装置の全てにおいて、常に上記のような危険性が発生する訳ではない。何故ならば、モールドレンズがない場合には、第1の領域604,704からの散乱光の放射強度分布はほぼ完全ランバーシアンになるため放射角が広がり全体的に単位立体角あたりの放射強度が低下するからである。しかしながら、モールド部のない状態でも十分な安全性(アパレント光源サイズ)が確保されたアイセーフ光源装置が望ましいことに変わりはない。

【0152】

さらに、図6(a)または図7(c)のアイセーフ光源装置において顕著な特徴として、それぞれの凹部610の最表面金属層、または凹部712の最表面の金属層721は、散乱光の広がり範囲において連続している。一方、例えば図7(a)においては、複合的な凹部704のうち、ざぐり穴部分の最表面金属層と円筒710の内壁金属層711の間にFR4基板703が露出し、第1の領域704、特に図示したように散乱光の空間分布が比較的強い主要な領域内で接している。したがって、図7(a)においては、例えば0.7以下程度の比較的小さい不均斉因子 g を有する散乱体を用いて第1の領域を構成した場合、あるいは任意の不均斉因子 g であっても幾何学的な光路長が比較的長い場合などには、樹脂基板703側への散乱光の漏れ量が無視できなくなることが多い。

【0153】

したがって、図6(a)あるいは図7(c)に示したように、単一あるいは複合的な凹部の構成として、主要な部分の最表面金属層が連続して設けられていることによって、光源装置としてより高い光取出し効率を安定して得ることができる。上記主要な金属層が連続的に設けられることは、基板側ワイヤボンディング点608や713が第1の領域の外側にあること、すなわち先に述べた特徴である第2の領域にワイヤが延びていることと、必ずしも一致する構成要件ではない。しかしながら、一般的に、第2の領域にワイヤが延びる構成の方が、上記金属層の連続性を得ることが容易であるのは言うまでもない。

【0154】

また、図7(a),(c)において、上記複合的な凹部を形成する円筒710,720の断面形状は必ずしも円である必要はない。製造工程を簡略化し低コスト化を図る上では円柱状または円錐状等が最も好ましいが、正方形や長方形をはじめとする多角形でもよく、半導体レーザの共振器軸に対して対称性を有することが近視野像引いては遠視野像の均一性の観点から好ましい。また、上記第2実施形態の図4およびこの第3実施形態の図6,図7から明らかなように、凹部全体の構成には任意性がある。すなわち、凹部全体としては、第2の領域に向かう開口部を有する形状であり、散乱領域としての主要な部分と接する最表面が金属層であることが望ましい。

【0155】

図6,図7の構成のように、半導体レーザ600,700の出射光の光軸と第2の領域605,705のレンズ部605a,705aの光軸が略直角に交わる多重散乱光学系の場合にも、凹部610,730の主要な壁面の傾斜角度を必ずしも45°とする必要はない。すなわち、第1の領域604,704において極めて多数回の散乱を受けるため、完全に幾何光学的に設計する必要はない。

【0156】

また、図7(a),(c)の構成のように、主に半導体レーザ700の片端面からの光出力を利用する場合には、散乱体が存在しないと仮定した場合に、第1の領域704と第2の領域705の境界面とレーザ光の光軸701との交点が上記2次

的面光源の中心点を通るように、凹部730と第2の領域705のレンズ部705aの中心軸をシフトすると好ましい。また、第1の領域704,714および第2の領域705の境界面上での光強度分布のピーク中心を、第2の領域705の光軸706上に載せて配置するのが望ましいことは言うまでもない。

【0157】

また、例えば図6に示すアイセーフ光源装置のように半導体レーザ600の両端面からの光出力を利用する構成では、凹部610の壁面の傾斜角度を大きめにとったり、逆に半導体レーザ600の共振器が相対的に短ければ上記凹部610の壁面の傾斜角度を小さめにとるといった変形が可能である。すなわち、第1の領域の散乱体が存在しないと仮定した場合に、レーザ光の光軸が複数に分割されて存在する場合には、上記2次的面光源の中心点に対して対称にかつ均等に分布するよう設計するのがむしろ好ましい。このようにして近視野像の光強度分布の平坦性(平均化した光強度分布の均一性)を向上することは、空間的コヒーレンスを直接低減する作用を有し、スペックル低減にも効果的である。

【0158】

図8は、図6,図7に示すアイセーフ光源装置の構成に対して、図3で説明した各種散乱体を種々のサイズおよび濃度でシリコーンゲルに分散した多数のアイセーフ光源装置について、近視野像を総合的に評価した結果を示している。図8の横軸は、輸送平均散乱回数 L/l_{AVE} で、仮想的に散乱体がないとした場合にレーザ光の光軸が第1の領域を通過するまでの幾何学的距離 L (図6(b)参照)を、第1の領域内の輸送平均自由行程 l_{AVE} で割った値である。図8の縦軸は、近視野像のスペックル量 σ_{PAR} である。図6(a),図7(a),(c)それぞれの構成の良好な近視野像の相対光強度分布は図6(c),図7(b),(d)に示している。

【0159】

図8を図3または図5と比較すると、スペックル量 σ_{PAR} の値が全体的に低減されていることは明白である。また、図6(a)および図7(a),(c)の構成によれば、同じ幾何学長であっても、多重散乱領域が最表面を金属層とする凹部によって取り囲まれていることによって効果的に散乱回数を稼ぎ、光学系全体の厚みを低減することが可能になる。特に、図7の構成で第1の領域の厚みを拡大したこと

により、単純換算で輸送平均散乱回数が数 1 0 0 回を超えると、スペックルが増大するという第 2 実施形態の図 5 と同様の傾向が明確に確認された。

【0 1 6 0】

また、図 6 または図 7 による凹部の構成に対しては、散乱材として粒度分布最頻値 D_s のサイズパラメータ q が略 1 ~ 1 5 の範囲にあり、シリコンゲルに対する屈折率差 Δn を比較的大きく ($\Delta n \geq 0.15$) 取ることができる TiO_2 等の金属酸化物やスチレン系ポリマー等が材料として非常に好ましいことが見出され、この傾向は第 2 実施形態の図 5 とほぼ同様である。

【0 1 6 1】

これらの散乱体を、典型的には 0.5 vol % ~ 3 0 vol %、より望ましくは 1 vol % ~ 1 0 vol % の濃度で分散することにより、好ましい散乱特性が得られた。スペックル量 $\sigma_{PAR} \leq 8 \times 10^{-2}$ を目安にして、好ましい散乱特性を有する分散ゲルを光学顕微鏡で観察すると、散乱体は略均一に分散しており、最近接距離の平均値 $\langle R \rangle$ は、常に $\langle R \rangle \leq 20 D_s$ の関係を満たすことが見出された。また、平均値 $\langle R \rangle \geq 30 D_s$ では、スペックル量 σ_{PAR} が急激に上昇した。逆に、散乱体を典型的には 3 0 vol % 以上に高濃度化するとスペックルが増大し始める傾向が明確に観測された。この状態の分散ゲルでは、1 0 μm 以上のクラスタとなり、疎な空間の割合が極めて大きくなっている場合が多く観察された。

【0 1 6 2】

図 6 (a) や図 7 (a), (c) の構成による新たな効果として、図 6 (c) や図 7 (b), (d) の近視野像の相対光強度分布から明らかなように、近視野像全体としての平坦性が向上した。上記特性は、先に述べたとおり、スペックルの低減に直接作用するほか、遠視野像パターンを狭幅化したり無駄な裾引き成分を抑制したりするために大きな効果を発揮する(後述)。さらに、第 1 の領域と第 2 の領域の界面上に形成される 2 次的面光源の広がり、凹部の開口に略類似した形状を持つため、光源サイズを明確に規定することができるアイセーフ光源装置を、確実にマージンを取って歩留まりよく製造することが可能になった。

【0 1 6 3】

また、第 2 実施形態の図 4 に示すアイセーフ光源装置の構成と比較すると、図

6 (b)に示したように斜面を有する凹部壁面によって光軸が変換される分、上記幾何学的長さ L が拡大されると共に、上記凹部の壁面の金属層の粗面で乱反射されることによって効率よく光が第1の領域内に拡がる効果がある。したがって、上記第1実施形態の図2のアイセーフ光源装置および第2実施形態の図4のアイセーフ光源装置の構成と比べて、散乱体濃度を低減でき、分散工程が容易になる。また、図7(a),(c)のように第1の領域の設計に自由度を設けることで、散乱体の粒径分布に対する許容範囲を広げ、アイセーフ光源装置の製造歩留まりを格段に向上することができた。特に、母材との屈折率差 Δn が0.09と比較的小さいアクリル系高架橋ポリマー微粒子であっても、5vol%~20vol%程度の比較的高濃度範囲に望ましい散乱特性を見出せる場合があった。このようなアクリル系微粒子は、有機系微粒子の中でも比較的小粒径化が容易であり、コスト的にも好ましい。

【0164】

次に、遠視野像について説明する。図6(a)の構成に対して、第1の領域604および第2の領域605の境界面と第2の領域605の拡大鏡としてのレンズ部605aの頂点との間の距離 H_c を変化させると共に、第2の領域605のレンズ部605aの半径 R を1.0mm~1.5mmで変化させた。また、図7(a),(c)の構成に対して、特に図7(a),(c)の円筒710,720の高さ h を種々に変更することにより、第1の領域704,714と第2の領域705との境界面と、第2の領域705の拡大鏡としてのレンズ部705aの頂点との間の距離 H_c を変化させると共に、第2の領域705のレンズ部705aの半径 R を1.0mm~1.5mmで変化させた。さらには、図6(a)または図7(a),(c)の各構成に応じて、2次的面光源の径も0.5mm~3mm程度の範囲で変化させた。このような種々のモジュールについて、遠視野像の半値全幅とスペックル量 σ_{PAR} を評価した結果を図9に示している。なお、遠視野像についても近視野像と同様の方法でスペックル量 σ_{PAR} を定義できるが、一貫性のある評価を行うためには測定系のFOV(視野角)に注意が必要である。ここでは、IRDAよりも若干厳しい仕様を想定し、1mの距離から1mm ϕ の受光部を望む立体角を測定ステップとし、これよりも高い分解能で固定して放射強度分布(FFP)測定を行った。

【0165】

図6(a)のアイセーフ光源装置の構成では、球面レンズ部605aの半径は $R = 1.1\text{ mm}$ であり、その材質であるエポキシ樹脂の屈折率 n は約1.5であることから、焦点距離 f は、

$$f = R \cdot n / (n - 1)$$

で表され、焦点は、レンズ部605aの頂点から樹脂基板603側に略3.3mmの距離に生じる。上記レンズ部605aの頂点から第1の領域604と第2の領域605との境界面までの距離 H_c は約1.3mmなので、横軸の H_c / f は0.39である。この H_c / f を小さくし、焦点位置を樹脂基板603側により深く配置することで放射強度分布(FFP)は狭くなる。これに伴い遠視野像のスペckル量 σ_{PAR} も増加する。2次的面光源がレンズ頂点に近付きすぎると、再び放射強度分布(FFP)が広がり始め、スペckル量としては飽和するような傾向が見出された。ここで、図9(b),(c)から明らかなように、半値全幅が比較的狭い場合(図9(b)側の約20度)も、広い場合(図9(c)側の約60度)も、半値角よりも外側の広角領域において放射強度の裾引きはほとんど発生せず、一般化ランバーシアン(\cos の n 乗)では表せない矩形に近い放射強度分布(FFP)が得られることがわかる。

【0166】

図9に示したデータの大部分の領域で、放射強度分布(FFP)半値全幅のほぼ2乗に反比例してスペckル量 σ_{PAR} が減少した。これは、上記2次的面光源は全体としてのグローバルなコヒーレンスはほぼ喪失しているものの、ローカルに見れば(散乱体のサイズのオーダーでは)、近視野像には依然として空間的なコヒーレンシが残っていることに起因する。上記2次的面光源の各面素からの最終的な散乱光が、互いに相関を持ったまま微小な角度をなして放射され、第2の領域で近視野像から遠視野像に変換される過程において、微小な角度で再び交差する確率を0にすることはできない。狭半値全幅を得るべく構成された第2の領域では相対的に上記交差確率が相対的に増し、遠視野像には個々に相関関係のない極めて多数のスペckルパターンが重ね合わせられる。したがって、放射強度が極端に落ち込むほどのスペckルは発生しないものの、スペckルを完全に消失させ

ることも難しい。また、半値全幅の放射角が 100° を超えると、上記スペckル量と半値角の相関関係が崩れると共に、放射強度分布(FFP)には半値角外への無駄な裾引き成分が生じるようになる(図示せず)。この領域の H_c/f においては、全光量を第2の領域に導くように光学系を構成することは困難であり、光出力または効率も低下する。

【0167】

しかしながら、多重散乱光学系の第2の領域を上記のように構成して上記低角交差の発生確率を低減することで、少なくともワイヤレス光通信用途として実用的に重要な放射角 $20^\circ \sim 60^\circ$ 程度の半値全幅の範囲においては、遠視野像スペckル量を全く問題のない値に抑制することができた($\sigma_{PAR} < 10^{-1}$)。より狭い放射強度分布(FFP)を得るには、例えば第2の領域が非球面レンズを備え、その非球面レンズを2次的面光源に拡大鏡として作用するように配置するとよい。

【0168】

ここで、上記第2実施形態の図4およびこの第3実施形態の図6、図7で示す第1の領域において、共通の問題となり得る隠蔽力について説明する。上記図4、図6および図7に示す構成において望ましい範囲の比較的小径(サイズパラメータ $q = 1 \sim 3$ 程度)の高屈折率差(屈折率差 $\Delta n > 0.5$)を有する散乱体を、例えば $20 \sim 100\%$ 以上の濃度で分散して第1の領域を構成すると、スペckル量 σ_{PAR} は極めて小さいレベル($< 10^{-2}$)に低減され得るものの、全出力光量が半導体レーザー本来の出力の半分に満たないモジュールとなる場合がある。この原因には複数あり、主に、散乱回数が極めて大きく凹部の最表面の金属層による吸収の累積が問題になる場合と、高濃度の散乱体を含む第1の領域からのコヒーレント後方散乱による戻り光によって半導体レーザー自身の発振特性が変わってしまう場合の2つがある。

【0169】

このような問題を回避し、上記第2実施形態の図4および第3実施形態の図6、図7に共通して有効な第1の領域の構成の変形例を次に説明する。この変形例は、比較的小粒径の散乱体に対して均一分散を得ることが難しい場合にも好まし

く実施することができる。例えば、上記散乱体を主(数密度として最大)としながら、上記範囲(サイズパラメータ $q = 1 \sim 3$)を逸脱し、相対的に大粒径の散乱体($q \geq 10$)を混合分散するとよい。この場合も、すべての散乱体を含めた平均最近接距離が、最頻径すなわち主として分散される散乱体の最頻径 D_s の20倍以内程度となるよう分散する。これにより、スペックル量を十分に低減しながら、第2の領域からの光の取り出し効率を高めるという効果が得られる。これは、主となる散乱体による不均斉の小さい散乱が依然として極めて多数回発生することと、副となる散乱体が鋭い前方散乱特性を示すものであっても光の波面分割および位相乱雑化の効果は期待でき、これらの相乗効果によってなされるものである。典型的には、主副混合比率を少なくとも9:1~8:2程度まで変えても、スペックル量 σ_{PAR} を 3×10^{-2} に維持して上記隠蔽力の問題を回避し、チップ状態の半導体レーザと上記種々のモジュールの電流-光出力特性にほとんど差が認められない分散条件を見出すことができた。このように、第1の領域内で混合分散を行うことにより分散工程が容易になると共に、第1の領域としての散乱特性は、主とする散乱体に対して想定される特性に近いものとしつつ、アイセーフティを満足する条件が見出された。

【0170】

また、上記混合分散を行うかわりに、第1の領域内で、異なるパラメータを持つ散乱体を空間的に分離して配置したり、同じ散乱体でも空間的に分散濃度を変えるなど、上記第1の領域を2層以上の複数の層からなる積層体として構成してもよい。上記第2実施形態の図4および第3実施形態の図6,図7で示す第1の領域に対しては、このような変形を極めて容易に実施することができる。

【0171】

例えば、比較的小粒径のサイズパラメータ q が1~15程度の散乱体を15vol%で単一分散することが困難であり、5vol%以下の濃度では均一分散は可能でも十分な散乱特性が得られないという状況にある場合、第1の領域の半導体レーザに近接する90%の領域を上記散乱体5vol%単一分散層で構成し、その最上部10%の領域に同じ散乱体を50vol%と高濃度分散した薄い層を設けてもよい。

【0172】

上記第1の領域の大部分を閉める領域内ではコヒーレントな波面を多数に分割する作用を主眼とし、その後、上記最上層で十分な多重散乱を発生させることで、隠蔽力を抑制しつつ十分なスペックル低減効果を得ることが可能であった。このようにして、第1の領域を多層化することにより、分散工程最適化の困難さは低減されるが、トータルのコスト面では不利になる。

【0173】

なお、ここで述べた第1の領域の変形例の効果は、上記隠蔽力の問題の解決に限られない。例えば、光学系としてサイズに対する制約が比較的緩く全光路長を長く取ることが可能な場合には、より分散工程が容易になったり、分散工程後の粘性を比較的低く保ってハンドリング(取り扱い)を容易にすることが可能になる。

【0174】

これまでに示した構成例において、実際に示した近視野像の形状から明らかに、アパレントな光源として一定の平均強度分布、すなわち矩形に近い近視野像を得ることは容易ではない。これはアイセーフティに対して必ずしも必要な条件ではないが、例えば光強度が $1/e$ 以下となる近視野像の幅が、光強度分布の形状が単純でないことによってロット毎に大きくばらつく場合等には、製造歩留まりが悪化してコストアップにつながり得る。また、多重散乱光学系の光軸方向の厚みが極めて薄い場合には、隠蔽力が問題となる濃度で分散しないと、所望の多重散乱特性が得られない状況に陥る傾向がある。また、極端にいびつな分布形状を持つ場合には、放射強度分布(FFP)の形状や対称性が実用的ではなくなる場合もある。

【0175】

そこで、このような諸問題を解決し、一層の小型化・薄型化の要求に対して、より製造歩留まりの高く効果的にスペックルを低減することができるアイセーフ光源装置について次の第4実施形態において説明する。

【0176】

(第4実施形態)

図10(a)はこの発明の第4実施形態の光源装置としてのアイセーフ光源装置の構成を示す断面図である。この第4実施形態のアイセーフ光源装置は、凹部の形状を除いて第3実施形態の図3(a)に示すアイセーフ光源装置と同様の構成をしている。

【0177】

図10(a)において、樹脂基板1003に形成された凹部1010の主要な壁面部分は、その開口に向かって径が広がるように構成され、深さ $h = 400 \mu\text{m}$ 、底面径 $d = 800 \mu\text{m}$ よりアスペクト比 $r (= h/d)$ は0.5である。また、上記樹脂基板1003上および凹部1010の最表面にAuメッキにより配線パターン1012を形成している。上記半導体レーザ1000の下面は、凹部1010の底面(配線パターン1012)に直接銀ペーストで固着されている。上記凹部1010の壁面の法線と半導体レーザ1000の出射光の光軸1001とのなす角度 θ が、設計上 $\theta = 6^\circ$ となるように、壁面を傾斜させており、散乱体が第1の領域に含まれないと仮定した場合には、図10(a)に示すように、半導体レーザ1000の出射光の光軸は、上記凹部1010内で複数回変換される。

【0178】

このような凹部1010の壁面は、例えば、樹脂基板1003に角度 θ および底面径を有する金属棒(図示せず)を、進入深さを制御して打ちこむといった工程で形成されるとよい。その後、上記凹部1010を有する樹脂基板1003に、ニッケル、銅の下地メッキおよび銀の本メッキ処理を行って配線パターン1012を形成する。したがって、上記凹部1010の最表面をなす金属層は銀となっている。また、このように構成することにより、図6や図7を用いて説明したように、基板1003側あるいは第2の領域の光軸方向1006以外への散乱光の漏れを抑制することができる。

【0179】

その後、発振波長 890 nm のGaAs基板上のInGaAs/AlGaAs系半導体レーザ1000をダイボンドとワイヤボンドした後、粒径最頻値 $D_s = 4 \mu\text{m}$ のアクリル系高架橋ポリマー微粒子を熱硬化型シリコンゲルに3wt%分散させ、上記凹部1010に注入し、硬化させて多重散乱光学系の第1の領域1004

とする。さらにエポキシ樹脂によるトランスファーモールドによって多重散乱光学系の第2の領域1005が完成する。

【0180】

図10(b)には、上記構成のアイセーフ光源装置で実際に得られる比較的良好な近視野像の相対光強度分布を示している。上記凹部1010の主要な壁面の構成は、傾斜角度 θ [deg]が、

$$C_{\min} \cdot r = 1$$

$$C_{\max} \cdot r = 20$$

より、

$$C_{\min} \cdot r \leq 3 \leq \theta \leq C_{\max} \cdot r$$

を満たしており、第2の領域1005の光軸1006方向への厚み、すなわち深さ h が $400 \mu\text{m}$ と短い場合であっても、効果的に多重散乱を発生させてスペックルを低減することができる。また、これまでに示したすべての構成例と比較しても、第1の領域1004と第2の領域1005との境界面に形成される2次の面光源の強度分布の平坦性が格段に向上していることがわかる。このような構成により、微小体積内で最も効果的にスペックルを低減することができる。

【0181】

これと同時に、遠視野像パターンも半値全幅約 30° の放射角で裾引きのないシャープな形状が得られた。また、近視野像のスペックル量 σ_{PAR} として略 2×10^{-2} と極めて低い値が得られ、遠視野像のスペックル量 σ_{PAR} として略 1×10^{-2} が得られた。さらに、一定の立体角内の出力光しか受光できないIL(電流-光出力)測定系によって、半導体レーザのチップ状態と上記アイセーフ光源装置状態のIL特性を比較しても、光の取り出し効率は低下していないことが確認された。

【0182】

また、図11(a)は、図10(a)に示すアイセーフ光源装置と同様に、効果的に近視野像を均一化しスペックルを低減する他のアイセーフ光源装置の構成を示している。ここでは、上記第1の領域における複合的な凹部1120の主要な部分を、開口部と底面部の断面形状がほぼ同一の円筒1110で構成している。上記

円筒 1110 の内周面に Ag メッキにより金属層 1111 を形成している。樹脂基板 1103 上の Au メッキ配線パターン 1112 および Au パンプ 1113 とあわせて凹部 1120 の全体が構成され、その最表面のほとんどが金属層となっている。

【0183】

上記凹部 1120 の主要な部分である円筒 1110 は、高さ $h = 350 \mu\text{m}$ 、内径 $d = 800 \mu\text{m}$ よりアスペクト比 $r (= h/d)$ が 0.44 である。上記金属層 1111 の法線と半導体レーザ 1100 から出射光の光軸 1102 とのなす角度 θ (傾斜角度) が略 6° となるように、円筒 1110 を傾斜させて樹脂基板 1103 上に設置した。ここで、

$$r/5 = 0.09$$

$$\tan \theta = 0.11$$

$$r/2 = 0.22$$

より、

$$r/5 \leq \tan \theta \leq r/2$$

なる関係が満たされている。上記傾斜角度 θ は相対的なものであって、上記凹部 1120 の主要な部分(円筒 1110)の軸を樹脂基板 1103 の法線に一致させ、かわりに半導体レーザチップを傾斜させてダイボンドしても、同様の効果が得られるが、いずれにしても実装の順序としては半導体レーザを先にダイボンドする方が容易である。

【0184】

上記凹部 1120 の壁面は、図 10 (a) に示すアイセーフ光源装置とは異なり、少なくとも内壁面全体に金属層 1111 を設けて予め準備された円筒 1110 を、配線パターン工程を終えた樹脂基板 1103 上に後付けする方が、製造工程および上記傾斜を与えるための工夫をより容易に実施することができる。図 11 (a) では、高さ約 $80 \mu\text{m}$ の Au パンプ 1113 を Au メッキ配線パターン 1112 上に配置し、上記円筒 1110 との間に介在させて銀ペーストで固着することで精度よく上記傾斜角度 θ を確保している。傾斜角度 θ の与え方については、他の様々な実施変形例を考えることも容易であるが、その後の工程としてゲル乃至

エラストマー等流動性の高い物質を注入することを考慮し、凹部1120全体として、樹脂基板1103との間に隙間なく形成される必要がある。また、このように構成することにより、図6や図7を用いて説明したように、基板1103側あるいは第2の領域の光軸方向1106以外への散乱光の漏れを抑制することができる。

【0185】

この図11(a)のアイセーフ光源装置では、粒径最頻値 D_s が $6\mu\text{m}$ のスチレン系高架橋ポリマー微粒子を用い、熱硬化型シリコンゲルに6wt%分散させたものを凹部1120に注入して、多重散乱光学系の第1の領域1104を形成している。さらに、エポキシ樹脂によるトランスファーモールドによって、多重散乱光学系の第2の領域1105を形成している。

【0186】

図11(b)には、上記構成のアイセーフ光源装置で実際に得られる近視野像を示している。上記凹部1120の主要な壁面の構成では、上記壁面の法線と半導体レーザーの出射光の光軸とのなす角度 θ [deg]が、

$$\max \{ \arctan(r/5), 3 \} \leq \theta \leq \arctan(r/2)$$

なる関係を満たしている。このため、上記円筒1110の高さ h (第1の領域の光軸1106方向への厚み)が $350\mu\text{m}$ と短い場合であっても、効果的に多重散乱を発生させてスペックルを低減することができた。図10(a)のアイセーフ光源装置と同様に、極めて高い2次的な面光源均一性と、近視野像および遠視野像のスペックルも極めて小さいことが分かる(近視野像のスペックル量 σ_{PAR} 略 8×10^{-3} 、遠視野像のスペックル量 σ_{PAR} 略 1×10^{-2})。また、半導体レーザー1100のチップ状態と上記アイセーフ光源装置状態の電流・光出力特性を比較しても、光の取り出し効率はほとんど低下していないことが確認された。

【0187】

しかしながら、この第4実施形態の図10(a)または図11(a)に示すような多重反射および多重散乱を併用する第1の領域1104, 1104において、散乱体単体での規格化散乱断面積が大きく等方性が高いものを用いると、第2の領域1105, 1105の光軸1106, 1106に垂直な方向への拡散が十分に起こ

らず、2次的面光源としての一様な近視野像強度分布が得難い傾向があり、その場合にはスペックルも十分には低減されなかった。また、均一な近視野像が得られる場合でも、光の取り出し効率が低下する傾向が見出され、隠蔽力の影響が顕在化した。逆に、サイズパラメータ q が 10～50 の比較的大粒径の好ましい散乱体を用い、上記傾斜角度 θ を変化させたモジュールの評価結果からは、図 10 (a) の構成においては傾斜角度 θ が約 10° を超えた場合や、図 11 (a) の構成においては傾斜角度 θ が約 15° を超えた場合には、各部のディメンジョンや散乱体の種類／濃度／混合比を最適化しても、過剰なスペックル(例えば $\sigma_{PAR} > 3 \times 10^{-1}$)が発生し得ることが見出された。

【0188】

さらに、サイズパラメータ q が 10～50 の比較的大粒径の散乱体を用いて、上記傾斜角度 θ を 0° とした場合には、図 10 (a) と図 11 (a) のいずれの構成でも、遠視野像の半値全幅としてはさほど変わらないものの、広角への放射強度が生じると共に、積分球による全光量測定で光出力が 10% 以上低下するアイセーフ光源装置が多発した。これは、主に、上記凹部 1010, 1120 の壁面に垂直に近い角度で入射する散乱光に対する微小な吸収の累積効果が顕在化したものである。上記凹部 1010, 1120 のアスペクト比 r によっては、上記傾斜角度 θ は極めて小さな値を取り得るが、上記広角への放射強度が生じるという問題と、積分球による全光量測定で光出力が 10% 以上低下するという問題を回避するため、少なくとも 3° 以上の傾斜角度 θ を与えることが望ましいことが見出された。

【0189】

このように、多重反射および多重散乱を利用する第 1 の領域として、図 10 (a) の場合は、傾斜角度 θ が、

$$C_{\min} \cdot r = 1$$

$$C_{\max} \cdot r = 10$$

より、

$$C_{\min} \cdot r \leq 3 \leq \theta \leq C_{\max} \cdot r$$

を満たすアスペクト比 r で凹部 1010 の主要な壁面を構成する。また、図 11

(a)の場合には、傾斜角度 θ が、

$$\max \{ \arctan(r/5), 3 \} \leq \theta \leq \arctan(r/2)$$

を満たすアスペクト比 r で凹部 1120 の主要な壁面を構成する。さらに、上記第1の領域に主として分散される散乱体をサイズパラメータ q が 10～50 程度と比較的大粒径とすることにより、上記相反する複数の要求を同時に満たすことが可能であることが見出された。

【0190】

また、上記のように比較的大粒径の散乱体を用いることで光源サイズは容易に拡大されて平坦化されるものの、スペックル低減効果が十分には得られない場合もあり得る。このような場合、例えばアクリル微粒子のように比較的低屈折率差の散乱体を主として 1 vol %～30 vol %、典型的には 10 wt % 程度分散し、さらに屈折率差 $\Delta n \geq 0.2$ 程度で、かつ、サイズパラメータ $q \leq 10$ 程度の相対的に散乱能の高い微粒子(例えば平均 $0.3 \mu\text{m}$ 径の TiO_2 微粒子)を、0.1 vol % 程度の割合で副として加え、混合分散するとよい。副として混合分散する散乱体の体積比を略 0.01 vol %～0.1 vol % とし、場合によっては 1 vol % までの範囲とすることにより、上記のスペックル低減効果が十分には得られないという問題を解決する条件を見出すことができた。

【0191】

図10(a)および図11(a)の構成に対して種々の散乱体を適用し、特にこれまでの他の構成との違いが顕著な近視野像に関する結果を図12に示し、特に、主となる低屈折率差の散乱体と、副となる高屈折率差の散乱体の混合分散に関する結果も示している。ここで、図12の横軸は、図5または図8と同じく輸送平均散乱回数 L/l_{AVE} であるが、幾何学的なディメンジョン L のとり方を変えている(図10, 図11参照)。図10(a), 図11(a)には散乱体がないと仮定した場合の半導体レーザの出射光の光軸が変換される様子を模式的に示しているが、これに沿って長さを定義しても、実際の多重散乱光学系としてはあまり意味がないためである。したがって、第1の領域 1004, 1104 および第2の領域 1005, 1105 の光軸 1006, 1106 方向への厚みをそれぞれ L として評価した。

【0192】

図12の顕著な特徴として、低屈折率差 Δn の SiO_2 やアクリル系高架橋粒子が更なるスペックル量 σ_{PAR} の低減に対して効果的な場合があることが挙げられる。典型的には、5vol%~30vol%程度の濃度範囲で十分なスペックル量 σ_{PAR} の低減が実現できた。また、図10(a),図11(a)の構成では、高濃度分散化したときのスペックル量の再上昇があまり顕著には観察されず飽和傾向を示している。このような効果は、比較的低屈折率差で大粒径の微粒子を用いることによる近視野像平坦化と分散均一性の容易さから生じるものである。

【0193】

比較的大きな屈折率差を有する TiO_2 やスチレン系においても、大粒径化することで、このアイセーフ光源装置の構成に適用してアイセーフティを確保することは可能であるが、特に TiO_2 では、隠蔽力の影響が大きく、図7の結果からさらにスペックル低減するような分散濃度範囲においては取り出せる光出力が極端に減少した。また、 SiO_2 (図12の×印)やアクリル系(図12の△印)の単体の分散では、スペックル量 σ_{PAR} が 10^{-2} 程度で飽和する傾向があるのに対して、比較的小粒径の高屈折率の散乱体を副として0.01vol%~0.1vol%程度混合して分散することにより、さらに優れた特性(+ : $\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2$, ▲ : アクリル系 + TiO_2)が得られ、隠蔽力の影響を受けることもほとんどなかった。

【0194】

このようにして、上記凹部の壁面の多重反射と散乱体の多重散乱の組み合わせを用いる構成においては、比較的低屈折率差(典型的には $0.05 \leq \Delta n \leq 0.2$ 程度)であっても、大粒径($q \geq 10$ 程度)の散乱体を主とし、上記 TiO_2 のような高屈折率差($\Delta n \geq 0.2$ 程度)で小粒径($q \leq 10$ 程度)の散乱体を副として混合分散することが好ましいことが見出された。スペックル低減の観点から許容可能な範囲内で比較的低い濃度でブレンドすることにより、より簡易な分散工程によって、主とする散乱体による2次的面光源の強度分布均一化作用と、光出力の取り出し効率を両立して十分なスペックル低減効果を得ることができる。

【0195】

また、上記混合分散を行うかわりに、上記のように異なる散乱体を空間的に分離して分散配置したり、各々の分散濃度を変えて上記第1の領域を2層乃至複数の層からなる積層体として構成してもよい。例えば、比較的大粒径のサイズパラメータ q が10～50の散乱体を15vol%で均一分散しても十分な多重散乱特性が得られない場合に、第1の領域のうち半導体レーザに近接する9割の領域を上記散乱体が10vol%の分散層で構成し、その上部の1割の領域に比較的小粒径でサイズパラメータ q が1～10程度の高屈折率差を有する散乱体を1vol%分散した薄い層を設けてもよい。このような多層化された第1の領域の最上層が仮に凝集体を含む多分散となっても、上記各条件(サイズパラメータ q , 分散濃度)を最適化して好ましい多重散乱特性を見出すことができる場合がある。このように、第1の領域を多層化することにより、分散工程最適化の困難さは低減されるが、トータルコストとしては不利になる。

【0196】

なお、図10(a)と図11(a)では、簡単のために片端面出射の半導体レーザを用いたが、いずれの構成においても、両端面出射型の半導体レーザを用いることでより容易に近視野像の均一性を高めることができる。スペックル低減の効果に関しても、両端面出射の半導体レーザの方が若干優れるものの、点光源が1つと2つ程度の違いでは格段の違いは見られないため、光ディスク用途等で大量生産技術が確立されている片端面出射の高出力半導体レーザを用いた方がコスト面では好ましい。また、上記第1の領域を形成する凹部における壁面の変形例として、第2の領域のレンズ部の光軸方向上方から見た筒状部分の断面形状は必ずしも円である必要はない。このような筒状部分の断面形状は、半導体レーザの光軸に対して軸対称であることは望ましいが、多角形等の任意形状であってもよく、これにより半導体レーザの光軸を少なくとも3以上の複数に分割し、より効果的に空間的なコヒーレンスを低減することが可能である。

【0197】

ここまで、高出力半導体レーザのコヒーレンスを低減するのに極めて有効な多重散乱光学系の構成要素である第1の領域および第2の領域について詳述してきたが、他の構成要素である半導体レーザ自身の特性については詳しく触れていな

かった。以下では、このアイセーフ光源装置に用いられる半導体レーザーの特性について説明する。

【0198】

既に述べたように、単体の半導体レーザーの典型的なスペクトル線幅は10MHz程度で、可干渉距離も少なくとも数m以上あり、これまで述べた多重散乱光学系の詳細な説明も、実際このような特性の半導体レーザーを搭載したアイセーフ光源装置の評価結果に基づいている。

【0199】

特に、通信用光源としてSiディテクタに適した高出力半導体レーザーとしては、GaAs/AlGaAs系のリッジストライプ構造が最も一般的であり、従来からCD-R/RW用に大量生産される780nm帯の半導体レーザーがコスト面の有利さからそのまま流用される場合があった。この発明で想定するような、高速・高出力動作のワイヤレス光通信用の光源装置に搭載する半導体レーザーとして、既存の光ディスク用の780nm帯のものや、EDFA(Erbium-doped Optical Fiber Amplifier; エルビウム・ドープ・ファイバ増幅器)用の980nm帯のものが、必ずしも最適という訳ではない。

【0200】

880nm~920nmの波長帯は、Siのピーク感度波長に近いこともさることながら、半導体レーザーの閾値電流および温度特性が上記光ディスク用の780nm帯素子と比べて格段に向上する。典型的には、共振器長600μmの780nm帯素子の閾値電流が35mA程度であるのに対して、例えば890nmでは15mA、温度特性値T₀約160K以上が得られる。このような特性は、理論的にも、980nm帯のInGaAs活性層素子の特性からも予想されることではあるが、実際に半導体レーザーとして詳しく調べられたことはほとんどなかった。本出願人は、780nmAlGaAs系半導体レーザーと最大限の製造プロセス上の互換性を取るにより低コスト化を図りながら、半導体レーザーのコヒーレンシに注目して素子構造に関する検討を進めた。その結果、上記InGaAsを含む活性層を用いることに加え、量子井戸バリア層または光ガイド層として、Alフリー化によるさらなる高出力動作に有利なGaAsP 3元系材料またはInGaAs

P4元系材料を採用することで、次のような際立った作用、効果が得られることが見出された。

【0201】

例えば、半導体レーザの層構造内に光ガイド層を設け、その光ガイド層の材料をInGaAsPとする。上記光ガイド層となる、GaAs基板上のInGaAsP混晶系においてはミシビリティギャップ(全率混晶が得られない成長条件)が存在する。この現象を利用して、光ガイド層の組成に空間的な揺らぎを生じさせることができる。この作用によって、レーザ発振波長に時間的な揺らぎを発生させ、時間的なコヒーレンシが低下する。このような半導体レーザをこの発明の多重散乱光学系と組み合わせることで、極めて効果的にスペckルを低減できることが見出された。

【0202】

典型的には、減圧MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition;有機金属気相成長)法を用いて結晶成長を行い、上記光ガイド層単体のフォトルミネッセンスをウェハ内でマッピングすると、ピーク波長面内分布の偏差として15nm~30nm程度、その空間分布の平均サイズが約10 μ m程度となる結晶成長条件を見出すことができる。例えば、成長温度T_gを均一かつ良質な薄膜を得るための通常の成長最適温度に対して、約50℃~200℃の範囲内で低下させるとよい。これにより、上記光ガイド層で光損失を生じるほどの結晶品質低下を招くことなく、組成揺らぎを発生させ得ることが素子特性から確認された。

【0203】

ここで、上記通常の成長最適温度(条件)とは、フォトルミネッセンスの面内均一性およびその強度がほぼ最良となる条件であり、一般的にはスピノーダル分解温度から100℃~150℃程度高温側に設定される。また、他の層、特に活性層の成長条件と整合するように、上記100℃~150℃の範囲以上に高温には設定されない。

【0204】

上記組成揺らぎを生じる条件は、基本的にはスピノーダル分解温度程度またはそれを下回る温度で結晶成長することにより見出されるが、フローチャンネル形

状などの個々の結晶成長装置に大きく依存するパラメータも多く、ガス流量等まで含めた普遍的条件を定量化することは難しい。

【0205】

図13(a),(b)は上記のような層を有する半導体レーザの具体的構造を示す断面図である。まず、図13(a)について詳しく述べる。

【0206】

図13(a)に示すように、アンドープDQW(Double Quantum Well)活性層は、80Å厚の $\text{In}_{0.074}\text{Ga}_{0.926}\text{As}$ 井戸層1301、50Å厚の $\text{In}_{0.100}\text{Ga}_{0.900}\text{As}_{0.657}\text{P}_{0.344}$ バリア層1302(引張歪-0.5%)、さらに上記バリア層1302と同一組成で200Å厚の光ガイド層1303(引張歪-0.5%)からなる。上記構造の半導体レーザにおいて、主として上記組成揺らぎの作用を与えるのは、光閉じ込め係数の関係からInGaAsP光ガイド層1303である。このような活性領域全体を、515℃と比較的低温で成長させる。なお、上記光ガイド層1302の混晶比は、組成揺らぎが生じないスピノーダル温度よりも高い通常の結晶成長を行った場合に、EPMA(X線マイクロ分析)から求めた平均値である。上記バリア層1302のエネルギーギャップは $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{As}$ に相当する。また、上記アンドープDQW活性層の両側に設けられた30Å厚のアンドープ $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 第2光ガイド層1304内で、結晶成長温度を通常のAlGaAs系材料の最適成長温度770℃にシフトさせる。

【0207】

以下、素子構造全体の例として、発振波長890nmに最適化した各層の詳細を示している。図13(a)において、1305は0.1μm厚のp型 $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$ 第3光ガイド層、1306は0.1μm厚のn型 $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$ 第3光ガイド層、1307は0.135μm厚のp型 $\text{Al}_{0.50}\text{Ga}_{0.50}\text{As}$ 第1クラッド層、1308は0.20μm厚のn型 $\text{Al}_{0.50}\text{Ga}_{0.50}\text{As}$ 第1クラッド層、1309は30Å厚のアンドープGaAsエッチングストップ層、1310は1.28μm厚のp型 $\text{Al}_{0.478}\text{Ga}_{0.522}\text{As}$ 第2クラッド層、1311は2.3μm厚のn型 $\text{Al}_{0.425}\text{Ga}_{0.575}\text{As}$ 第2クラッド層、1312はn型 $\text{Al}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$ ブロック層、1313はp++型GaAsキャップ層、1314はバッファおよび基板のn型

GaAs層である。

【0208】

上記半導体レーザ1300を第3実施形態の図6(a)に構成を示した多重散乱光学系に適用した。散乱体には、図6(a)と同様の平均粒径 $0.8\mu\text{m}$ のスチレン系架橋微粒子を、分散母材には熱硬化型シリコンゲルを用いて10wt%の濃度で分散したものを用いる。この半導体レーザ1300を用いたアイセーフ光源装置のスペックル量 σ_{PAR} は、近視野像、遠視野像ともに図6(a)のアイセーフ光源装置の構成で得られた値と比べて、略 $1/2 \sim 1/10$ 程度に低減された(図示せず)。なお、先に図6, 図7, 図10および図11の構成要素として示した半導体レーザは、活性層井戸層がInGaAs DQWであることは同じであること以外はCD-R/RW用の古典的なGaAs/AlGaAsのみからなる構造を有している。すなわち、上記半導体レーザ1300のような組成揺らぎは存在しないレーザ素子である。

【0209】

このようにして、InGaAsP層の空間的な組成揺らぎを有する半導体レーザ1300は、この発明の多重散乱光学系の構成要素として、スペックルの低減に極めて有効であることが明らかになった。上記半導体レーザ1300を搭載したアイセーフ光源装置は、CW100mW動作時に、単峰ながら時間積分値として約 1.5nm のスペクトル幅を示し、この特性を保ったまま少なくとも 70°C で2000時間以上の素子寿命が得られた。また、 $100\text{mA}_{\text{p-p}}$ の大振幅で注入電流を変調すると、スペクトル線幅の広がりがさらに顕著になることも見出された。

【0210】

そこで、第3実施形態の図6(a)のアイセーフ光源装置と上記半導体レーザ1300単体および上記半導体レーザ1300を搭載した図6(a)のアイセーフ光源装置のそれぞれに対して、スペーシャルフィルタを通してマイケルソン干渉計により可干渉距離 L_c の測定を行った。その結果、半導体レーザ1300を光源素子とする2者では1桁以上可干渉距離 L_c が短くなっており、なおかつ、この2者間でもモジュール化した方が可干渉距離 L_c が短いことが認められた。すな

わち、半導体レーザ 1300 では、通常のレーザと比べて時間的コヒーレンシが大幅に低下することに加え、この発明の多重散乱光学系の第 1 の領域が半導体レーザに近接して配置されるため、コヒーレント後方散乱ピークによって半導体レーザの光軸上に戻り光が発生し、上記半導体レーザ 1300 自身のスペクトル線幅の増大作用とは独立に、時間的コヒーレンシを低下させる効果があることも確認された。

【0211】

以上説明したように、半導体レーザ内部に、空間的に微小な組成揺らぎを有する光ガイド層を導入し、発振周波数(波長)にダイナミックな揺らぎを与えて時間的コヒーレンシを低減することができる。

【0212】

さらに、図 13 (b)を参照して、同様の作用を有する他の半導体レーザの構造を説明する。図 13 (a)と同一の層には同一参照番号を付している。ここでは、活性領域から距離を置いて p 型 $\text{In}_{0.379}\text{Ga}_{0.621}\text{As}_{0.251}\text{P}_{0.749}$ 光ガイド層 1323 を新たに設けて、上記光ガイド層 1323 のみに組成揺らぎを発生させている。光閉じ込め係数を確保し、時間的コヒーレンシの低減効果を顕著に得るために、光ガイド層 1323 は、比較的厚く 450 Å 厚とし、GaAs 基板に概ね格子整合させている。上記光ガイド層 1323 の成長温度は 680℃ に下げた(スピノーダル分解温度は約 780℃)。また、両側の (Al)GaAs 層 1307, 1309 との成長温度の切り替えは、(Al)GaAs 層 1307, 1309 の結晶成長時に待ち時間を設けて行う。また、ここでの活性領域内のバリア層 1321 および第 1 光ガイド層 1322 は、アンドープ $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ とし、InGaAs 層 1301 と同じ成長温度 650℃ で成長させる。

【0213】

図 13 (b)の素子構造を有する半導体レーザ 1320 を用いて、図 13 (a)と同様のスペックル評価を行った結果、同等の組成揺らぎを有する光ガイド層 1303 と光ガイド層 1323 の光閉じ込め係数を略等しくすることで、ほぼ同様の時間的コヒーレンシ低減効果が得られることが明らかになった。

【0214】

なお、半導体レーザの構造内に、通常のAlGaAs層にかえて組成揺らぎを有するInGaAsP層を導入することは、図13(a),(b)の2つの半導体レーザで示した層のみに限定されるものではない。すなわち、量子井戸バリア層1302、それに隣接する光ガイド(SCH)層1303、または新たに設ける光ガイド層1322等のいずれか、または任意の組み合わせに対して適用することができる。特に、多重量子井戸構造内などの比較的薄いバリア層1302等に対しては、格子不整合系を含めた $Ga_{1-X}As_YP_{1-Y}$ ($0 < X < 1, 0 < Y < 1$)で表される3元系または $In_XGa_{1-X}As_YP_{1-Y}$ ($0 < X < 1, 0 < Y < 1$)で表される4元系を用いることができる。あるいはまた、高出力化よりも温度特性を重視するレーザ素子においては、活性層からの電子のオーバーフローをブロックするための層として、例えば歪を有するAlGaAsSb層を、活性層内あるいはその近傍に加えることが効果的である。この場合においても、上記InGaAsP層によるスペックル低減に対する諸効果は、温度特性の向上とは独立に、全く同様に得ることができるのは言うまでもない。さらにMOCVDあるいはMBE(分子線ビームエピタキシー)等の種々の結晶成長条件を工夫することにより、上記AlGaAsSb電子ブロック層においても、層厚及び組成の空間的な揺らぎを生じさせることも可能である。

【0215】

さらに、歪量子井戸層1301(InGaAs)の結晶成長において、意図的に島状の3次元成長を行い、その層厚の面内分布を顕著に発生させることによって、擬似的なゲイングレーティングを形成することができる。これに関しても上記と同様のモジュール状態での評価を行った結果、上記InGaAsP層と同様、スペクトル線幅の増大作用によるスペックルの低減効果が観察された。ただし、上記擬似的ゲイングレーティングを用いると、IL特性のリニアリティは損なわれる傾向が見られた。

【0216】

上記組成または層厚の少なくとも一方に空間的な揺らぎを有する層構造を、半導体レーザ内で組み合わせることによって、一層のコヒーレンシ低減効果を生じさせ得ることは言うまでもない。しかしながら、半導体レーザの信頼性の観点か

らは、活性領域から距離を置いた InGaAsP 光ガイド層 1323 等によってスペクトル線幅の増大作用を得て、量子井戸層 1301 自体は良好な結晶品質を得るための成長を行う方が好ましい。

【0217】

上記のような擬似的なグレーティング作用によるスペクトル線幅の拡がり、その形成方法から明らかなように、実空間における構造の位相が共振器全体として曖昧であること、または、典型的にはグレインサイズが波長の数倍以上に大きく、さらにブラッグ条件を正確に満たさないことに起因する。一方で、完全に平坦／組成揺らぎがない(または極めて小さい)層のみで構成された半導体レーザに比べ、ゲイン／等価屈折率の空間揺らぎと定在波とのオーバーラップ量が縦モード毎に激しく変動するため、特定のモードで閾値利得が最低となり、単一縦モード発振する傾向が生じる。実際、上記レーザチップ単体の測定例では、少なくとも CW100mW まで単一縦・横モードを維持したまま動作し、電流・光出力特性のリニアリティも良好であった。素子によっては、上記効果に起因する高出力でのキンクまたはモードホッピングが発生することがあるものの、ワイヤレス光通信のようにバイナリで大振幅の強度変調を行うには十分な特性が得られる。

【0218】

(第5実施形態)

ところで、図13(a),(b)に示すスペクトル線幅を拡大した半導体レーザ1300,1320に限らず任意の半導体レーザを多重散乱光学系と組み合わせて使用する場合に、これまで具体的に説明してきた樹脂基板上のモールド品やリードフレームベースの部品に限られる必要はない。すなわち、図14に示すように、3.5mmφや5.6mmφの小型CANパッケージを用いてこの発明の多重散乱光学系を構成することができる。

【0219】

図14に示すように、半導体レーザ1400は、通常のパッケージングと同様に、ステム1403にダイボンドされワイヤボンドされる。さらに、キャップ1410の内部に散乱体を分散したシリコンゲルを充填して、多重散乱光学系の第1の領域1404を形成している。特に、拡散光がキャップ1410の内壁に

まで広がる場合には、多重散乱光学系に特有の内壁部による光吸収の累積問題を回避することが望ましい。すなわち、キャップ 1 4 1 0 の内壁は、通常の Ni メッキ等ではなく、Au メッキまたは銀ペースト塗布等の表面処理がなされて、あらゆる角度の入射光に対して高反射率を有する金属層 1 4 1 1 とするのがよい。これにより、一層のスペックル低減効果と近視野像の平坦性が格段に向上することは既に述べたとおりである。

【 0 2 2 0 】

また、通常のキャップシール工程は、ここでは上記シリコンゲルの硬化工程に変更される。さらに、キャップガラス 1 4 0 6 上に多重散乱系の第 2 の領域の拡大鏡として、レンズ作用を有するエポキシ樹脂層 1 4 0 5 を形成している。図 9 を参照して説明したように、所望の放射強度分布が得られるように、ステム上の半導体レーザのダイボンド位置や、上記エポキシ層の厚さおよび曲率半径を調節することにより、第 1 の領域 1 4 0 4 とキャップガラス 1 4 0 6 の境界面に形成される 2 次的面光源とレンズ部であるエポキシ樹脂層 1 4 0 5 の頂点との距離を好ましい値に設定できる。

【 0 2 2 1 】

このような多重散乱光学系の構成に対して、上記のようにモールドモジュールで行ったのと同様、半導体レーザ構造の違いを評価した。その結果、通常の組成揺らぎ等のない InGaAs / AlGaAs 系レーザの場合と比べ、上記半導体レーザ 1 3 0 0 (図 1 3 (a) に示す) を搭載した場合、近視野像のスペックル量 σ_{PAR} が少なくとも $1/3 \sim 1/10$ 程度のレベルに低下することが確認された。

【 0 2 2 2 】

ここで、上記第 1 ～第 4 実施形態の図 2 ～図 1 2 で説明した多重散乱光学系の構成においては、第 1 の領域と第 2 の領域が直接接し、その境界面にコヒーレンシが効果的に低減された 2 次的な面光源が形成されていた。これに対して、図 1 4 のアイセーフ光源装置では、この第 1 の領域 1 4 0 4 とエポキシ樹脂層 1 4 0 5 がキャップガラス 1 4 0 6 を挟んで接している。しかしながら、ここまでに説明してきたこの発明の主旨から明らかなように、エポキシ樹脂層 1 4 0 5 とキャップガラス 1 4 0 6 を合わせた散乱体を全く含まない領域が、ここでの多重散乱

光学系の第2の領域として作用する。

【0223】

より詳しくは、第1の領域1404とキャップガラス1406との境界面に形成される2次的面光源から放出される散乱光は、屈折率1.4のシリコーンゲルを母材とする領域から、屈折率1.6のガラス層(1406)に入射しさらに屈折率1.5のエポキシ樹脂層1405に入射する。上記ガラス層(1406)とエポキシ樹脂層1405の境界には屈折率の不連続面が存在するものの、この2層(キャップガラス1406とエポキシ樹脂層1405)によって、半導体レーザ1400の側にこれまでの構成と同様に近軸焦点が形成され、その位置は上記2次的面光源よりも深くに位置することは容易に示すことができる。したがって、上記ガラス層(1406)とエポキシ樹脂層1405の2層全体がこの発明の多重散乱光学系の第2の領域として作用することは明らかである。

【0224】

このように、この発明の多重散乱光学系の第1の領域および第2の領域は、それぞれがこれまでに説明した作用を有するものである限り、上記第1,第2の領域内部を多層化する等の変形を施すことができる。ただし、第2の領域に、第2の領域内の他の部分または第1の領域母材よりも相対的に低屈折率で、かつ、屈折率差が例えば0.1以上と大きい層が含まれると、第1の領域から入射する散乱光がかなりの割合で全反射を受け、第2の領域から第1の領域への再入射する過程が顕著になる。この場合、第1の領域の散乱特性が増強される効果が得られ、場合によっては隠蔽力の影響が顕在化するが、これに応じた各部の最適化を行うことによって、好ましい多重散乱光学系を得ることができる。

【0225】

(第6実施形態)

図15(a)はこの発明の第6実施形態のアイセーフ光源装置を用いたワイヤレス光通信用の光通信モジュールの構成を示す断面図である。

【0226】

まず、実装形態として、図15(a)に示すように、光通信モジュールの支持体となる厚さ500 μ mのFR4基板(ガラスエポキシ樹脂基板)1501上に、発

振波長890nmの半導体レーザ1502、駆動および受信回路を集積した駆動IC(集積回路)1506、および、厚さ250 μ mのSi-pinフォトダイオード1507が能動素子として搭載されている。上記半導体レーザ1502は、平均ストライプ幅2.5 μ m、共振器長500 μ m、AR/HR端面コート、InGaAs単一量子井戸活性層等の構造的特徴を備え、280mWのCODレベルを有している。

【0227】

上記半導体レーザ1502は、先述の詳細な説明と類似した傾斜角45°の壁面を有する戴頭円錐状の凹部1503aが形成された金属基体1503にダイボンドされている。また、上記金属基体1503は全体の厚さが500 μ m、上記凹部1503aの深さは300 μ mであり、その最表面全面に滑らかなAgメッキが施されている。上記光通信モジュール全体の回路構成に関する詳細は割愛するが、各部がワイヤボンディングによってFR4基板1501上のAu配線パターンを介して電氣的に接続されている。また、FR4基板1501の側面乃至裏面に掛けて、はんだ付け用にVccやGND、Tx/Rx等の各端子が引き出され配置されている。

【0228】

さらに、上記金属基体1503の凹部1503aは、平均粒径Dsが0.3 μ m($q=2.1$)のTiO₂が2wt%の重量比で分散されたシリコーンゲルで満たされ、多重散乱光学系の第1の領域1504が形成されている。特に、凹部1503aの開口の上面をも覆うように分散ゲル(シリコーンゲル)を注入することで、Auワイヤ1510と金属基体1503がショートすることを効果的に防止している。また、光通信モジュール全体を、意図的な散乱体の分散を行っていないエポキシ樹脂をトランスファーモールドすることで封止している。十分な数のサンプルを評価し、測定誤差を含む平均値として、近視野像に関しては、半値全幅は約1.2mm、スペックル量の平均値 $\langle\sigma_{PAR}\rangle=0.025\pm0.001$ が得られた。また、遠視野像は裾引きのない切れのよいパターンで、半値全幅は約30°、スペックル量の平均値 $\langle\sigma_{PAR}\rangle=0.022\pm0.001$ が得られた。

【0229】

ここで、図15(a)の実装形態において特に重要な特徴は、上記第1の領域1504が半導体レーザ1502に近接し、金属基体1503の凹部1503a内にのみ存在することである。これにより、既に述べてきたような第1の領域1504における空間的(あるいはまた時間的)なコヒーレンシの低減効果に加えて、送信系レンズ部である多重散乱光学系の第2の領域1505と、受信系レンズ部1508を含む上記封止樹脂を同一の工程で一括形成することができる。すなわち、送信系レンズ部(1505)および受信系レンズ部1508を含む封止樹脂中には散乱体が含まれないため、受信系レンズ部1508の形状とフォトダイオード1507との距離を、送信側の多重散乱光学系と独立して最適設計することが可能である。

【0230】

このようにして、多重散乱光学系を有し、クラス1のアイセーフティを満たす送信部と、多重散乱光学系を含まずより広いFOV(視野角)と高い感度を両立する受信部とを同時に実現することができる。また、図15(a)の光通信モジュール1500は、FR4基板も含めた全体の厚さが1.6mm、幅は7mm×2mmと極小型の電子部品として歩留まりよく製造され、かつ、-40℃～+85℃の使用条件下で十分な信頼性を有することを確認した。

【0231】

なお、図15(b)には、上記光通信モジュール1500の送信部の室温における電流・光出力特性を示している。典型的な100mW動作(軸上放射強度295mW/sr)時の動作電流は120mA、動作電圧は1.8Vであった。また、上記駆動IC1506を介さず端子から直接に送信系の帯域幅を測定したところ、少なくとも測定装置上の限界である500MHzまでパワーペナルティはなく、半導体レーザを搭載した光源として、高速化のポテンシャルも全く損なわれていないことが確認された。

【0232】

上記第1～第6実施形態では、半導体発光素子として単一の狭ストライプ高出力半導体レーザを用いたアイセーフ光源装置について説明したが、LEDに対する光電変換効率の優位性を有する半導体発光素子はこれに限らず、複数ストライ

プのアレイレーザ、ブロードエリアレーザ、あるいはSLD等、時間的・空間的なコヒーレンシが異なる種々の光源素子を用いた光源装置にこの発明を適用してもよい。

【0233】

【発明の効果】

以上より明らかなように、この発明の光源装置によれば、半導体レーザを搭載する小型の樹脂封止光通信モジュールにおいて、量産効果が高く高出力化技術が進んでいる近赤外域の半導体レーザを採用することにより、低電流高出力動作および高速動作と、スペックルフリーなクラス1のアイセーフティの確保が、同時に最低のコストで実現することができる。その結果、ビーム放射角を制御して使い勝手を損なわずに、安価で高速なワイヤレス光通信システムの基幹デバイスを実現することができる。

【0234】

特に、この発明の光源装置の半導体発光素子として、InGaAsを活性層に備え、880nm～920nmの波長範囲内で発振する半導体レーザを採用することによって、極めて閾値電流および動作電流を低くし、APC(Automatic Power Control)フリーまたはバイアスフリーの簡単な駆動回路で安定に高出力動作を行うと共に、受光素子には安価なSiフォトダイオードを用いることで、上記ワイヤレス光通信システムのコストパフォーマンスを格段に向上させることができる。

【0235】

この発明で開示される光源装置の多重散乱光学系の個々の構成に対して得られる効果は次の通りである。

【0236】

散乱体を相対的に高濃度を含み上記半導体レーザに近接する第1の領域と、上記第1の領域に接し自由空間に至る第2の領域からなる多重散乱光学系を有し、上記第1の領域と第2の領域との境界面に形成される2次的面光源の少なくとも主要な部分に対して、第2の領域を拡大鏡として作用させる。これにより、レーザ光の空間的コヒーレンシを低減する多重散乱を、極めて微小な第1の領域にお

いて効果的に生じさせて、第2の領域で放射強度の角度分布特性の制御を主に行うことによって、各部の最適化を切り分けて行うことができる。また、上記第2の領域が含む散乱体の濃度を第1の領域の $1/10$ 以下とすることにより、放射強度の半値角外への不要な裾引きが抑制される。このように、簡便な光学系で近視野像のアイセーフティ化と遠視野像パターンの整形を両立することができる。

【0237】

また、上記半導体レーザに近接した微小な第1の領域において、平均として少なくとも数 10 次以上の多重散乱を経ることにより、上記第1の領域と第2の領域との境界面に、所望のアパレントな光源サイズを有する単一の2次的面光源を形成し、クラス1のアイセーフティを確保することができる。すなわち、 $0.01\text{ mm} \sim 0.1\text{ mm}$ 程度の広がりを持つ近視野像の局所的なピーク構造が微細化・不明瞭化される。また、近視野像のPAR振幅の確率分布がガウス分布と見なされるようになり、スペックル量 σ_{PAR} は 10^{-2} 台、またはそれ以下の極めて小さいレベルまで低減することができる。

【0238】

また、上記第1の領域の作用によって、第1の領域と第2の領域との境界面に形成される2次的面光源の少なくとも主要な部分に対して、上記第2の領域が拡大鏡として作用することにより、比較的広角への散乱成分まで効率よく集めながら、上記第2の領域から自由空間への近視野から遠視野への変換過程において、光の経路が局所的に低角で重なり合う確率が低減される。したがって、遠視野像のスペックルを抑制しつつ放射強度の均一性が高く切れのよい遠視野像パターンが形成される。このように、微小な多重散乱光学系においても、好ましい光学特性とアイセーフティの確保を両立させることができる。

【0239】

また、上記第1の領域の構成要素である散乱体の直径最頻値 D_s は、サイズパラメータ q として略 $1 \sim 50$ の範囲から選択する。多重反射を用いない多重散乱光学系においては、サイズパラメータ q が $1 \sim 15$ 、より望ましくは $1 \sim 10$ の範囲を満たす散乱体であって、分散媒質との屈折率差 $\Delta n \geq 0.15$ 程度の散乱体を主として分散させる。また、多重反射と多重散乱を併用する多重散乱光学系

においては、サイズパラメータ q が 10～50 の範囲の比較的低屈折率差の散乱体を主として分散する。

【0240】

また、上記サイズパラメータの範囲内で複数の粒径分布ピークを有したり、異なる屈折率の材料による複数の散乱体を混合して分散する。このような構成によって、高濃度な単分散の困難さや近視野像の不均一性、遠視野像の裾引きといった問題を解決しながら、効果的にスペックルを低減してアイセーフティが確保される。上記サイズパラメータ q と、第1の領域の母材と主として分散される散乱体の屈折率差 Δn の関係は、積 $\Delta n \cdot q$ が略2～8の範囲、特に3の近傍となるように、サイズパラメータ q を選ぶことにより、望ましい粒子種を選択する目安が得られる。

【0241】

上記第1の領域における上記散乱体の平均最近接距離が、その粒径最頻値 D_s の略20倍以下となるよう高濃度分散することにより、mmオーダの微小な体積内で極めて効率よく空間的コヒーレンスを低減する分散条件を容易に見出すことができる。また、半導体レーザ自身に戻り光誘起の周波数揺らぎを発生させることができる。

【0242】

また、上記第1の領域を、ゲル状またはゴム状の物質(エラストマー)を母材として構成することにより、体積比0.5vol%～30vol%、特に1vol%～10vol%の散乱体濃度で均一分散を得つつ、トランスファーモールドのように高圧のかかる工程を経ても上記第1の領域を安定に保持することができる。特に、硬化前の粘度が6000mPa・s以下程度のシリコーンゲルは、簡易型の安価な分散・混練装置で好適に用いられる。さらに、散乱体をゲルまたはゴム等の母材に分散し、上記第1の領域として半導体レーザに近接して設けることにより、放熱性および応力緩和効果を得ると共に、コヒーレント後方散乱を発生させ、半導体レーザの時間的なコヒーレンスを低下させることができる。

【0243】

また、最表面の少なくとも一部に金属層を有する壁面および底面から構成され

る凹部の底面に半導体レーザが直接または間接に固着され、上記凹部を構成する壁面および底面の少なくとも一部が、上記第1の領域内の散乱光に対する反射面となり、かつ上記第1の領域の形状を定める保持面とする。これにより、多重散乱領域のディメンジョン(寸法)を明確に規定し、散乱体濃度を制御することができる。特に、上記最表面の金属層が凹部をなすことで、その凹部内に安定に形成・保持された第1の領域で発生する散乱光が、全体として第2の領域に向かって導波される。特に、上記最表面の金属層に銀を用いることで、上記導波効果を有する境界面の反射率を高め、多重散乱特有の光吸収の累積問題を抑制できる。

【0244】

また、上記最表面の金属層が、少なくとも、上記第1の領域内に空間分布する散乱光の到達範囲内にある主要な部分において、上記金属以外の物質が露出しないよう連続的に形成される。これにより、第1の領域内に空間分布する散乱光が、光軸方向以外(基板側等)に漏れ出すことを効果的に防止し、光出力の損失を招くことなく光源サイズを明確化し、空間的コヒーレンスを効率よく低減することができる。

【0245】

また、上記凹部の壁面の少なくとも一部に形成された金属層の表面は、上記半導体レーザの出射光の光軸方向を、上記第1の領域と第2の領域との境界面側に変える反射面とすることにより、効果的に散乱光路長を広げ、少なくとも初期の散乱(乱反射)を簡易な工程で得られる反射面で生じさせて、小型の多重散乱光学系においても十分な多重散乱の作用を得られる。

【0246】

上記構成において、主として分散される散乱体のサイズパラメータ q は略1～15の範囲、特に1～10の範囲を満たすものがよい。これにより、パリスティックな直進光成分を効果的に減衰させると共に、光源として利用可能な光出力が効率よく得られる。第1の領域の母材と散乱体の屈折率差 Δn は0.1以上、特に0.15以上とすることにより、多重散乱光学系において好ましい散乱特性が得られる。

【0247】

また、上記構成は、最も容易にアイセーフな微小多重散乱光学系を構成し、散乱体の隠蔽力の影響を軽減して、光出力を損失がない良好な光学特性を得ることができる。また、上記半導体レーザの出射光の光軸が凹部の底面に略平行になるように、端面発光型の半導体レーザを簡便なダイボンドの形態によって実装でき、低コストで製造できる。

【 0 2 4 8 】

上記比較的小粒径のサイズパラメータ q が 1 ～ 1 5 程度の散乱体を主とし、比較的大粒径のサイズパラメータ q が 5 0 以下程度の散乱体を副として混合分散することにより、分散工程を容易にしつつアイセーフティを満足する条件が見出される。また、第 1 の領域を、上記比較的小粒径のサイズパラメータ q が 1 ～ 1 5 程度の散乱体を主とする部分と、相対的に大粒径の上記散乱体と同じまたは異なる散乱体を主とする部分とで積層化することによっても、分散工程の容易化とスペックル低減効果を両立することができる。

【 0 2 4 9 】

また、上記凹部を構成する壁面の少なくとも主要な一部は、上記半導体レーザの出力光の光軸を複数回変換する反射面とする。特に、その壁面の主要な部分に特定の傾斜角度を持たせ、散乱体が存在しないと仮定した場合に 2 回 ～ 5 回程度の反射回数で上記凹部の開口に達する構成とする。これにより、第 2 の領域の光軸方向への厚みが薄い多重散乱光学系においても、十分な多重散乱と光の取り出し効率を両立し、2 次的面光源の均一性を格段に向上させてスペックル低減を図ることができる。

【 0 2 5 0 】

また、上記凹部が開口に向かって径が広がるようにし、その凹部の底面の径に対する深さの比であるアスペクト比 r と、上記壁面の法線と半導体レーザの光軸とのなす角度を θ [d e g] に対して、

$$\max \{ 2 r, 3 \} \leq \theta \leq 2 0 r$$

なる関係を満たす。これにより、スペックル低減のための多重散乱とそれに伴う上記金属層による光吸収の累積問題に関する好ましい最適条件を見出すことができる。

【0251】

上記構成において、第1の領域に主として分散される散乱体のサイズパラメータ q は略10～50の範囲、特に15～40の範囲とする。これにより、より効果的に近視野像を均一化し、容易にアパレント光源のサイズを広げることができる。また、比較的大きな粒径の散乱体を主として含む場合、分散工程における母材および混練装置の組み合わせに対する制限が緩和される。また、高出力半導体レーザとして一般的な端面発光型のものを、簡便なダイボンドによって実装し、余分なコスト要因を付加せずにアイセーフな光源装置を構成できる。

【0252】

また、上記第1の領域において、上記凹部の開口部と底面部の断面形状がほぼ同一の筒状をなし、上記凹部のアスペクト比 r と、上記凹部の壁面の法線が半導体レーザ本来の光軸となす角度 θ が、

$$\text{atan}(r/5) \leq \theta \leq \text{atan}(r/2)$$

なる関係を満たし、上記凹部の壁面を、半導体レーザの取捨項の光軸に対して相対的に傾斜して設置する。これにより、第2の領域の拡大鏡の光軸方向への厚みが薄い多重散乱光学系においても、十分な多重散乱と光の取り出し効率を両立し、2次的面光源の均一性を格段に向上させてスペックル低減を図ることができる。

【0253】

上記構成において、第1の領域に主として分散される散乱体のサイズパラメータ q は略10～50の範囲、特に15～40の範囲とする。これにより、より効果的に近視野像を均一化し、容易にアパレント光源のサイズを広げることができる。

【0254】

上記多重反射と多重散乱の組み合わせを用いる構成においては、比較的低屈折率差で大粒径($q \geq 10$ 程度)の散乱体を主とし、比較的高屈折率差で小粒径($q \leq 10$ 程度)の散乱体を副として混合分散するのとよい。2次的面光源のスペックルの低減化および光強度分布の均一化と、光出力の取り出し効率の向上を両立することかが容易になる。また、比較的低屈折率差(典型的には $\Delta n \leq 0.1$ 程度

)で大粒径($q \geq 10$ 程度)の散乱体を主とする部分と、比較的高屈折率差($\Delta n \geq 0.1$ 程度)で小粒径($q \leq 10$ 程度)の散乱体を副とする部分とを積層化して第1の領域とするとよい。これにより、2次的面光源のスペックルの低減化および光強度分布の平坦化と、光出力の取り出し効率との両立を図ることが容易になる。

【0255】

また、上記GaAs基板上のInGaAs層を含んだ活性層を有し、発振波長が880nm～920nmの範囲にある半導体レーザを用いた光源装置を送信手段とすることによって、880nm～920nm波長帯にピーク感度波長を有する受信手段としてのSiフォトダイオードとの間で光伝送が可能となる。したがって、この光源装置を用いることにより、ワイヤレス光通信向けに、クラス1のアイセーフティを満たし、最も安価でかつ優れた電氣的・光学的特性をあわせ持つ光通信モジュールを構成することができる。

【0256】

また特に、上記GaAs基板上のInGaAs量子井戸層を含んだ活性層を有し、他の相対的に光密度の高い層、例えばInGaAs層に近接する量子バリア層や光ガイド層、あるいは活性層とは別に設ける光ガイド層等を、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ ($0 \leq x < 1, 0 < y < 1$)で表される3元または4元からなる層の少なくとも一方を含めて構成しAlフリー化することによって、上記880nm～920nm波長帯において、最も高出力化が図れるアイセーフ光源装置を提供することが可能となる。したがって、この光源装置を用いることにより、ワイヤレス光通信向けに、クラス1のアイセーフティを満たし、最も安価でかつ優れた電氣的・光学的特性をあわせ持つ光通信モジュールを構成することができる。

【0257】

また、上記半導体レーザのInGaAs量子井戸層、あるいは量子バリア層や光ガイド層、あるいは活性層と別に設ける光ガイド層等の結晶成長において、意図的に層厚の揺らぎを生じる層を形成することによって、レーザ動作時のスペクトル線幅を拡げることができる。また、意図的に局所的な組成揺らぎを生じる層を形成することによって、スペクトル線幅を拡げることができる。このような組成または層厚の空間的な揺らぎを有する半導体レーザを用いることによって、多重

散乱光学系との相乗効果によりスペックルをさらに低減することができる。

【0258】

また特に、InGaAs活性層に近接する量子井戸バリア層や光ガイド層または活性層とは別に設けられる光ガイド層としてGaAsP 3元系材料またはInGaAsP 4元系材料を層構造に含む半導体レーザを用いる場合に、成長条件の工夫により、位相の曖昧な擬似的グレーティングを共振器内に有する擬似的なDFB（分布帰還型）レーザを構成することができる。これにより、時間的なコヒーレンスを通常の高出力半導体レーザに比べ1桁以上低減できた。このようにしてスペクトル線幅を拡げながら、高出力動作に対する十分な信頼性が確保される。大振幅で注入電流を変調することでより一層のスペクトル線幅の拡大効果が得られる。したがって、スペックルをほぼ完全に消失したクラス1のアイセーフティを得ながら、高出力半導体レーザとして最高レベルの低動作電流特性を有する光源装置を構成することができる。

【0259】

また、特に高出力化よりも温度特性を重視するレーザ素子においては、電子ブロック層として歪を有するAlGaAsSb層を、活性層内あるいはその近傍に含めることも好ましい。この場合も、上記InGaAsや $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ で表される3元または4元からなる層による諸効果を同様に得ることができるのは言うまでもない。さらにMOCVDあるいはMBE（分子線ビームエピタキシー）等の種々の結晶成長条件を工夫することにより、上記AlGaAsSb電子ブロック層においても、層厚及び組成の空間的な揺らぎを生じさせることが可能である。

【0260】

また、上記半導体レーザに直接または間接に接続されたワイヤの少なくとも一部が上記第2の領域内にあることによって、上記半導体レーザへの通電中に第2の領域が破損したり剥離したりしても、上記ワイヤが第2の領域とともに引き剥がされて断線して半導体レーザへの通電を遮断するため、ユーザの目にコヒーレンスの高いレーザ光が入るのを防止でき、安全性をより向上できる。

【0261】

また、この多重散乱光学系は、樹脂基板やリードフレーム上のモールドタイプ

の光源装置のみならず、CANパッケージを利用しても極めて小型のアイセーフ光源装置として利用することができる。特に、第1の領域および第2の領域を多層化することにより、種々の変形例を構成し得る。

【0262】

また、上記半導体レーザを紫外域で発振する活性層を有する材料系とし、その出力光が、特に第1の領域内において白色光に波長変換されるとともに多重散乱されて自由空間に放出される光源装置を構成するとよい。または、上記光源装置を含むプロジェクション型のディスプレイモジュールを構成するとよい。これにより、壁面や紙面に文字や画像情報を投射する超小型かつ低消費電力のプロジェクションモジュールを極めて低コストに実現することができる。

【0263】

上記光源装置では、多重散乱光学系の第1の領域が上記半導体レーザに近接する微小領域として形成されるため、フォトダイオードとの集積化・一体モジュール化において受信感度を劣化させることがない。したがって、既存のIrDAトランシーバ並みの小型化および低コスト化と、既存の光無線LAN製品並みまたはそれを凌ぐ高速性および広い通信エリアを兼ね備えた従来にないワイヤレス光通信モジュールを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 図1はこの発明の光源装置としてのアイセーフ光源装置の多重散乱光学系の概略を説明する図である。

【図2】 図2はこの発明の第1実施形態のアイセーフ光源装置の構成を示す断面図である。

【図3】 図3(a)～(g)は上記アイセーフ光源装置の近視野像に関するデータを総合的に示す図である。

【図4】 図4はこの発明の第2実施形態のアイセーフ光源装置の構成を示す断面図である。

【図5】 図5(a)～(d)は上記アイセーフ光源装置の近視野像に関するデータを総合的に示す図である。

【図6】 図6(a)はこの発明の第3実施形態のアイセーフ光源装置の構成

を示す断面図であり、図 6 (b)は半導体レーザの光路を示す概略図であり、図 6 (c)は近視野像の相対光強度分布を示す図である。

【図 7】 図 7 (a)は上記第 3 実施形態のアイセーフ光源装置の他の構成を示す断面図であり、図 7 (b)は図 7 (a)に示すアイセーフ光源装置の近視野像の相対光強度分布を示す図であり、図 7 (c)は上記第 3 実施形態のアイセーフ光源装置の他のもう 1 つの構成を示す断面図であり、図 7 (d)は図 7 (c)に示すアイセーフ光源装置の近視野像の相対光強度分布を示す図である。

【図 8】 図 8 は図 6 (a),図 7 (a),(c)に示すアイセーフ光源装置において、近視野像を総合的に評価した結果を示す図である。

【図 9】 図 9 は図 6 (a),図 7 (a),(c)に示すアイセーフ光源装置において、遠視野像の半値全幅とスペックル量を評価した結果を示す図である。

【図 1 0】 図 1 0 (a)はこの発明の第 4 実施形態のアイセーフ光源装置の構成を示す断面図であり、図 1 0 (b)は上記アイセーフ光源装置の近視野像の相対光強度分布を示す図である。

【図 1 1】 図 1 1 (a)はこの発明の第 4 実施形態のアイセーフ光源装置の他の構成を示す断面図であり、図 1 1 (b)は上記アイセーフ光源装置の近視野像の相対光強度分布を示す図である。

【図 1 2】 図 1 2 は図 1 1 (a)に示すアイセーフ光源装置の近視野像に関するデータを総合的に示す図である。

【図 1 3】 図 1 3 は上記アイセーフ光源装置に特に好ましい高出力半導体レーザの構造を示す図である。

【図 1 4】 図 1 4 はこの発明の第 5 実施形態のアイセーフ光源装置の構成を示す断面図である。

【図 1 5】 図 1 5 (a)は上記アイセーフ光源装置を用いた光通信モジュールの構成を示す断面図であり、図 1 5 (b)は上記光通信モジュールの送信部の室温における電流・光出力特性を示す図である。

【図 1 6】 図 1 6 は従来の拡散板を用いた光源装置の構成を示す図である。

【符号の説明】

100,105…スポット、

200,600,700,1000,1100,1300,1320,1400…半

導体レーザ、

101,201,601,701,1102…光軸、

102,204,604,704,1004,1404…第1の領域、

103…散乱体、

104,205,605,705,1005…第2の領域、

106,206,606,706,1006,1106…光軸、

203,603,703,1003,1103…樹脂基板、

210,610,730,1010,1120,1503a…凹部、

400,710,720,1110…円筒、

402,608,612,1012,1112…配線パターン、

401,711,721,1111,1411…金属層、

1113…Auバンプ、

1403…ステム、

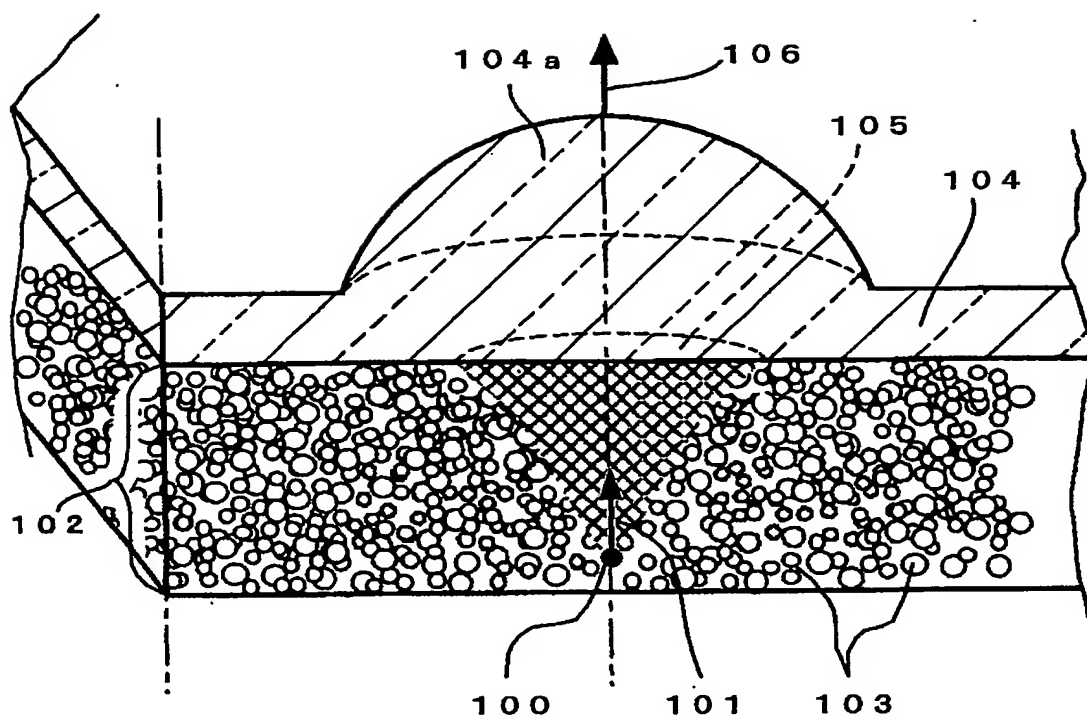
1405…エポキシ樹脂層、

1406…キャップガラス、

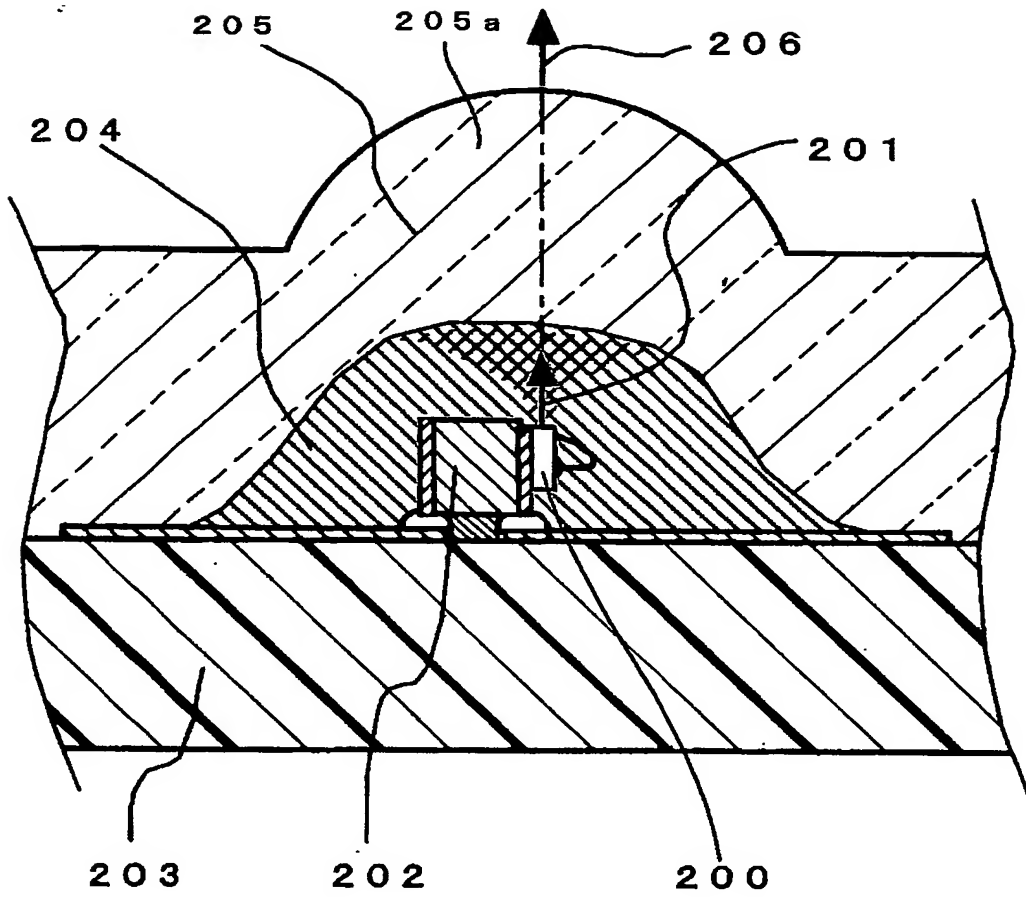
1501…FR4基板。

【書類名】 図面

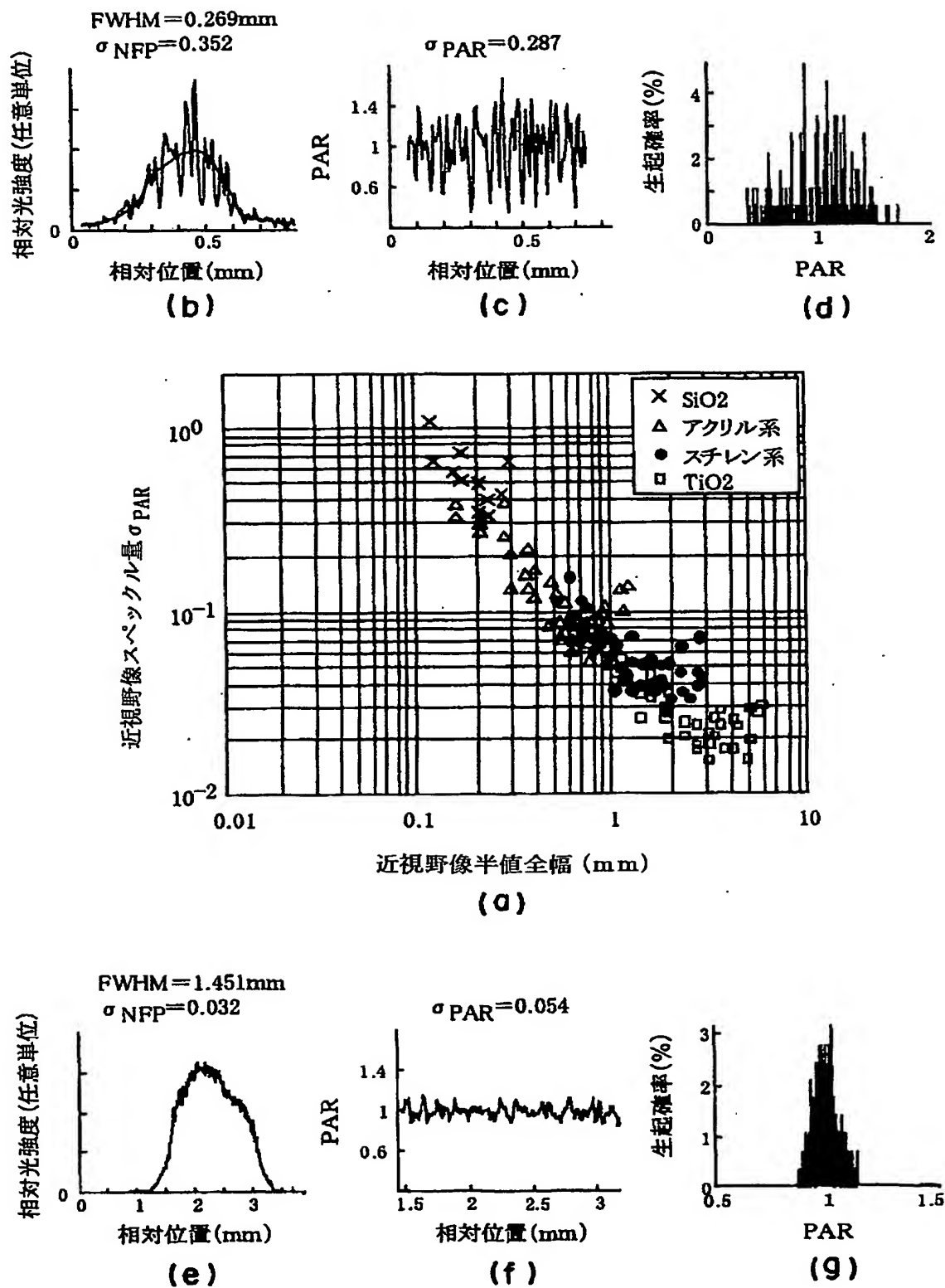
【図1】



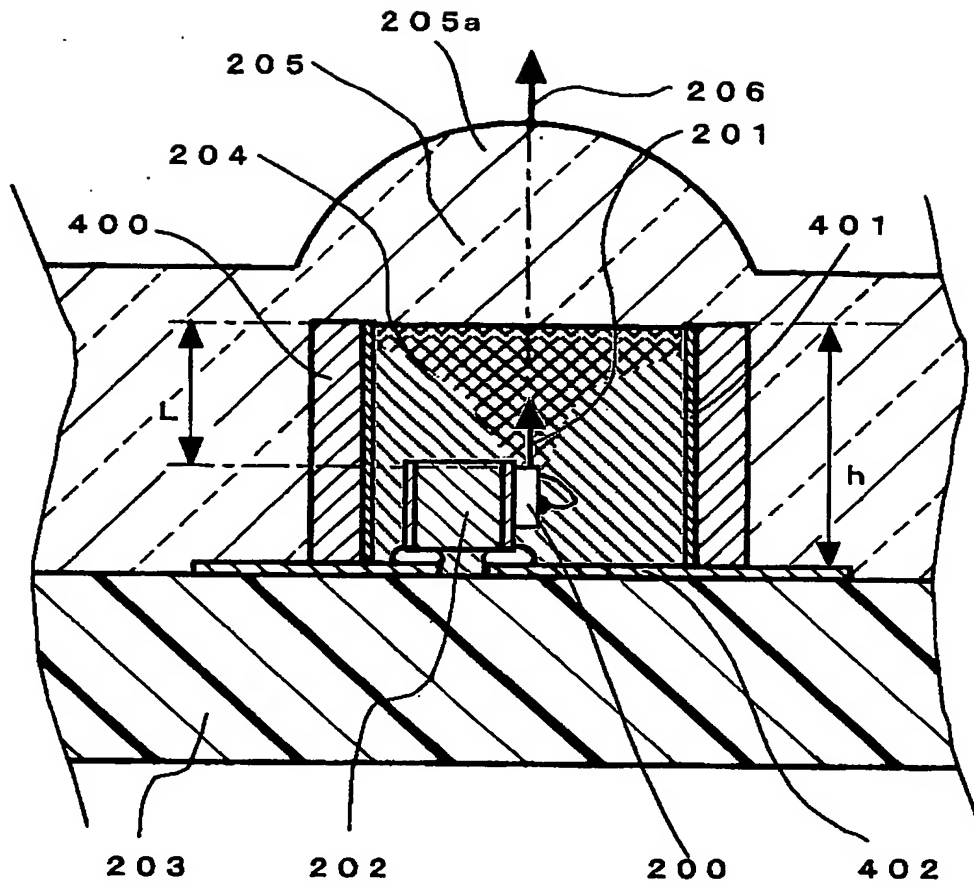
【図2】



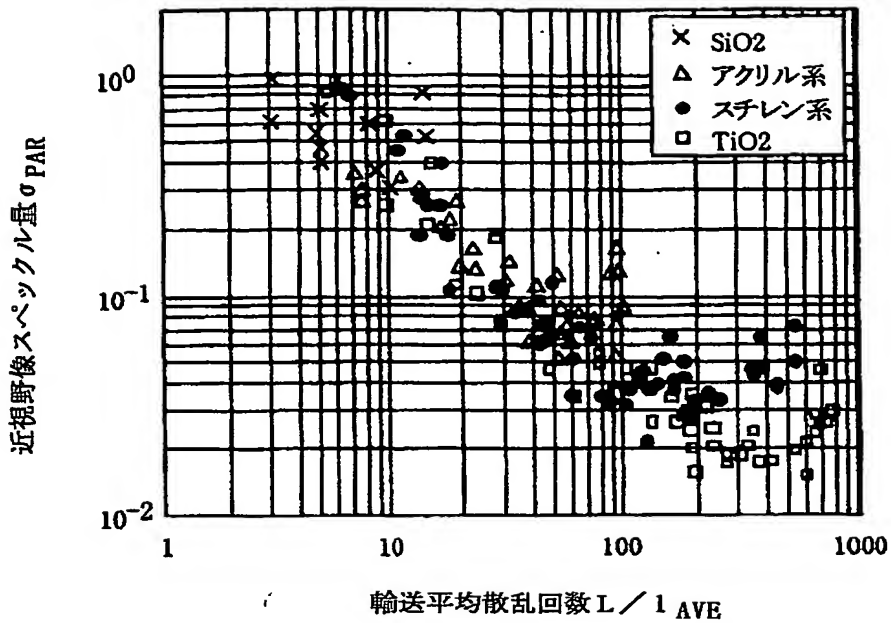
【図 3】



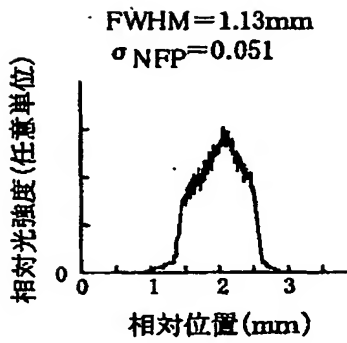
【図4】



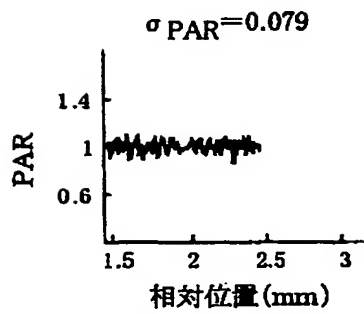
【図 5】



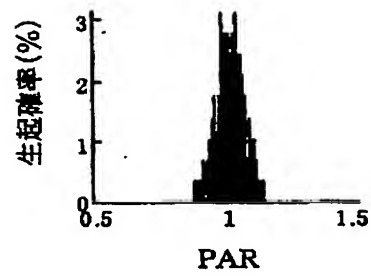
(a)



(b)

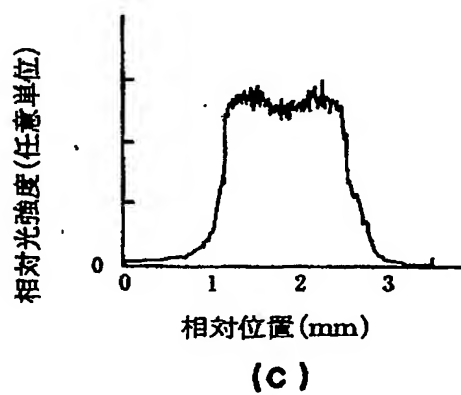
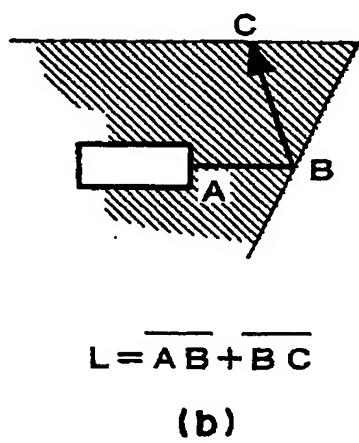
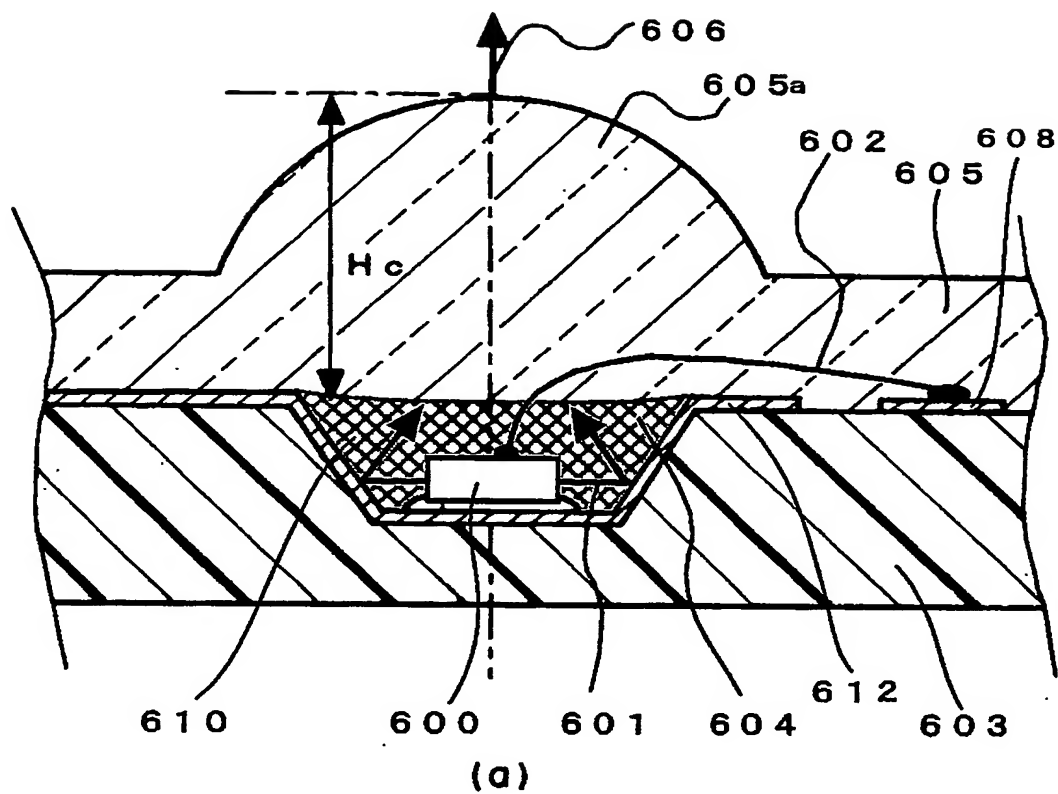


(c)

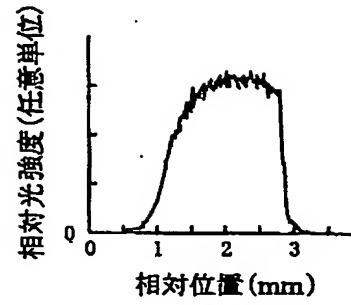
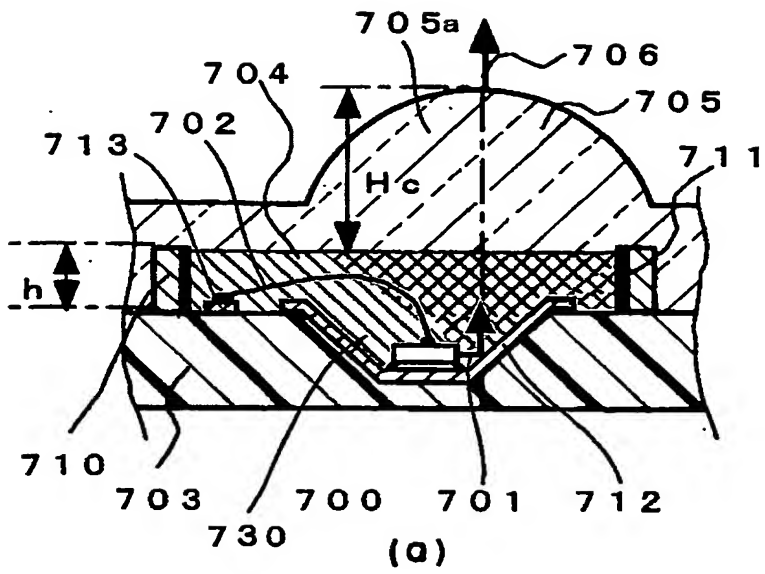


(d)

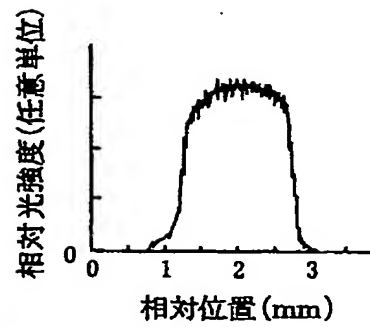
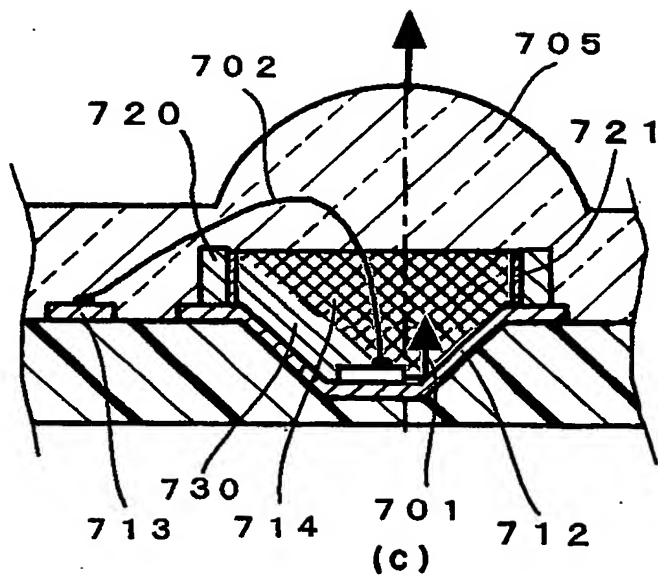
【图 6】



【図7】

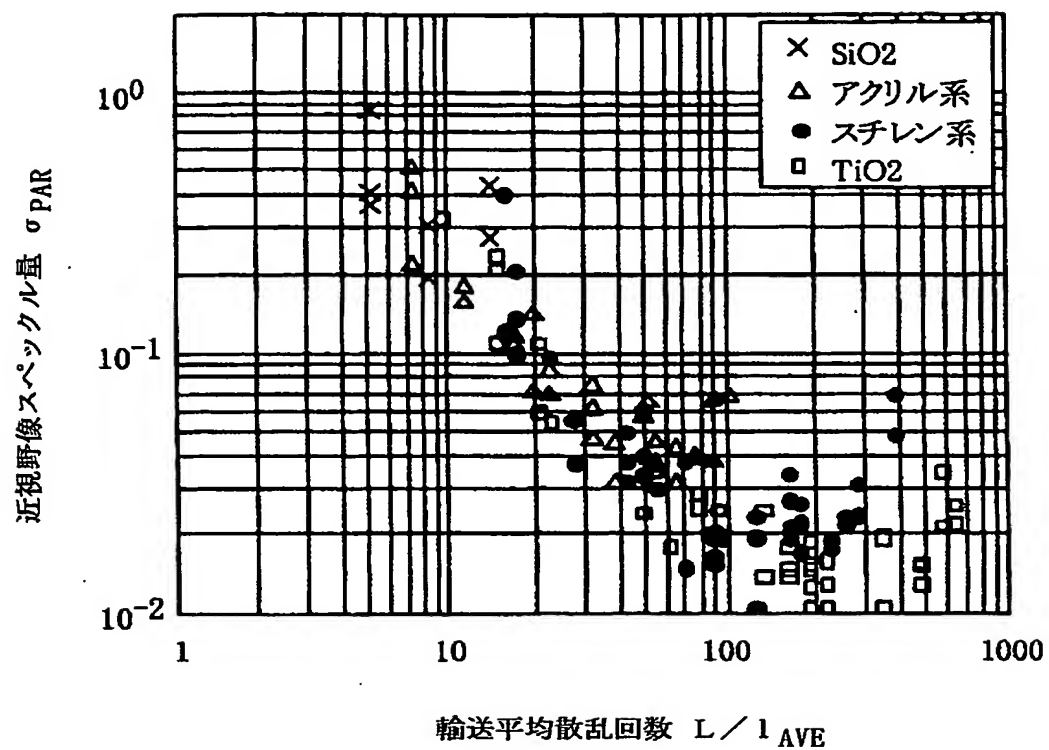


(b)

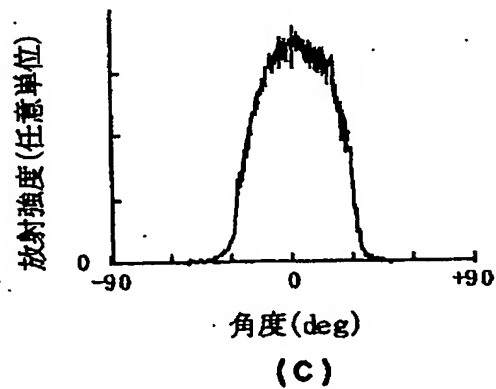
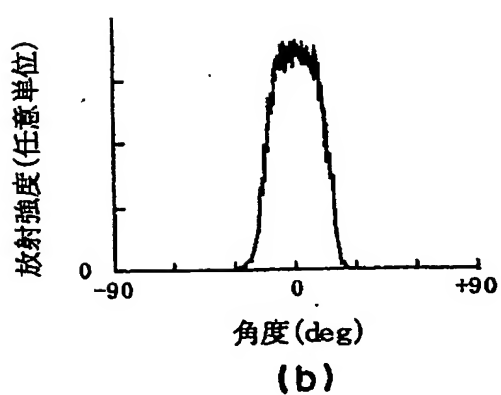
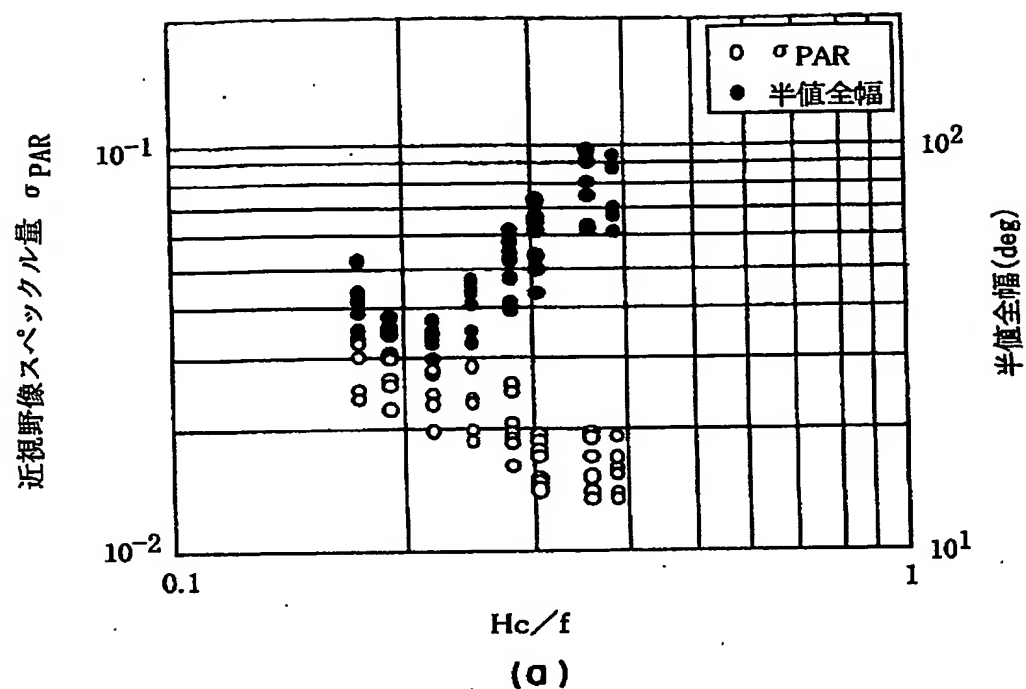


(d)

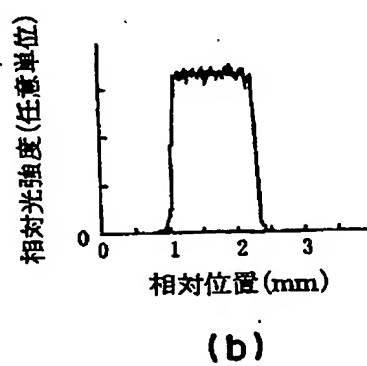
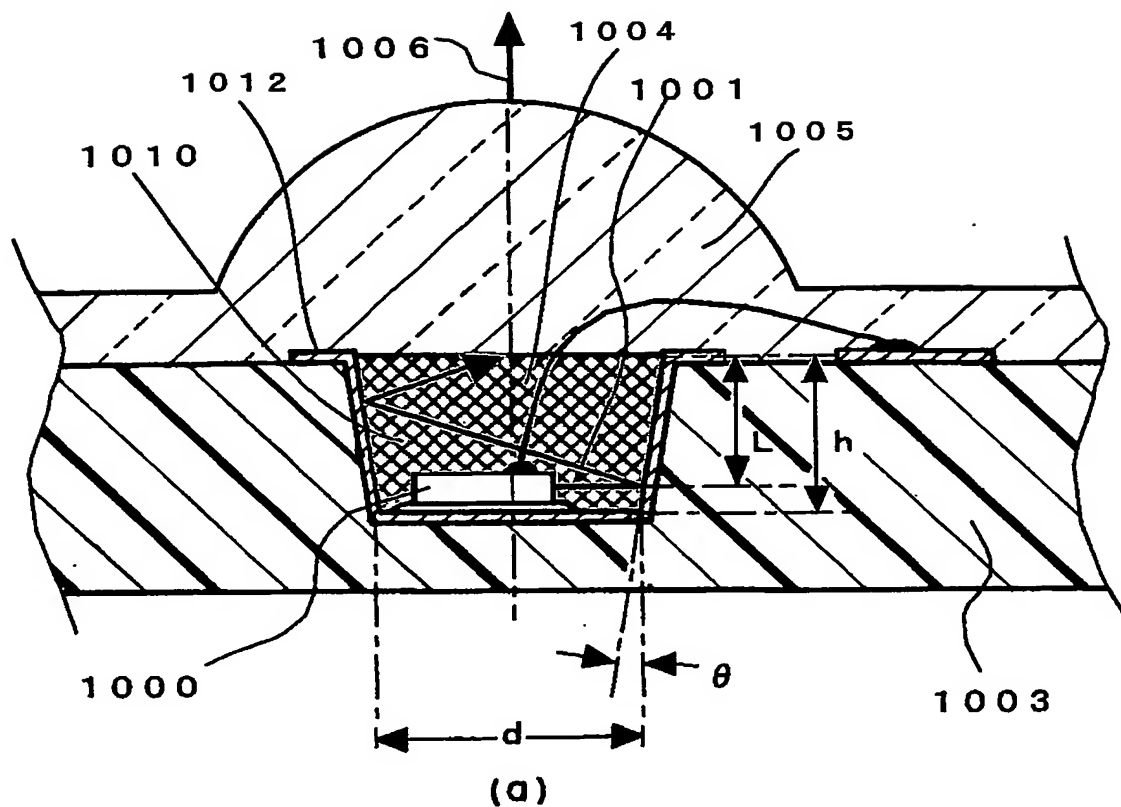
【図 8】



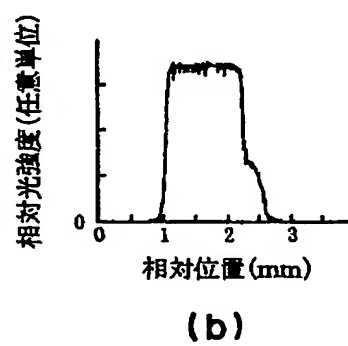
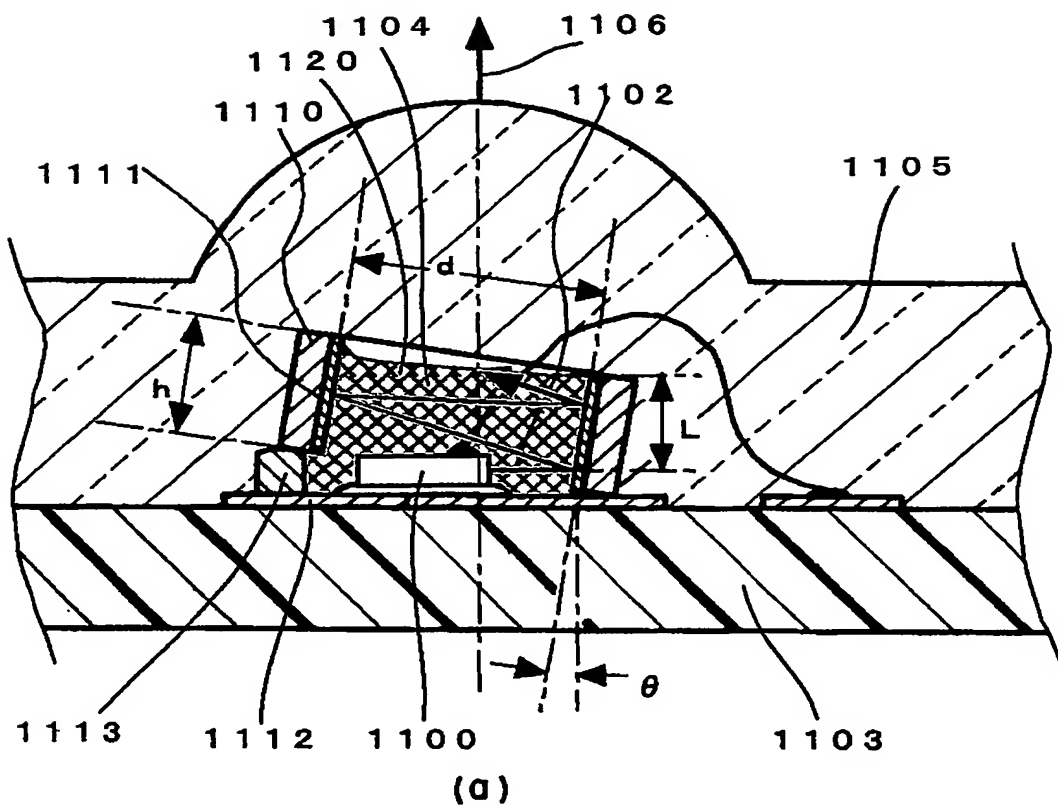
【図9】



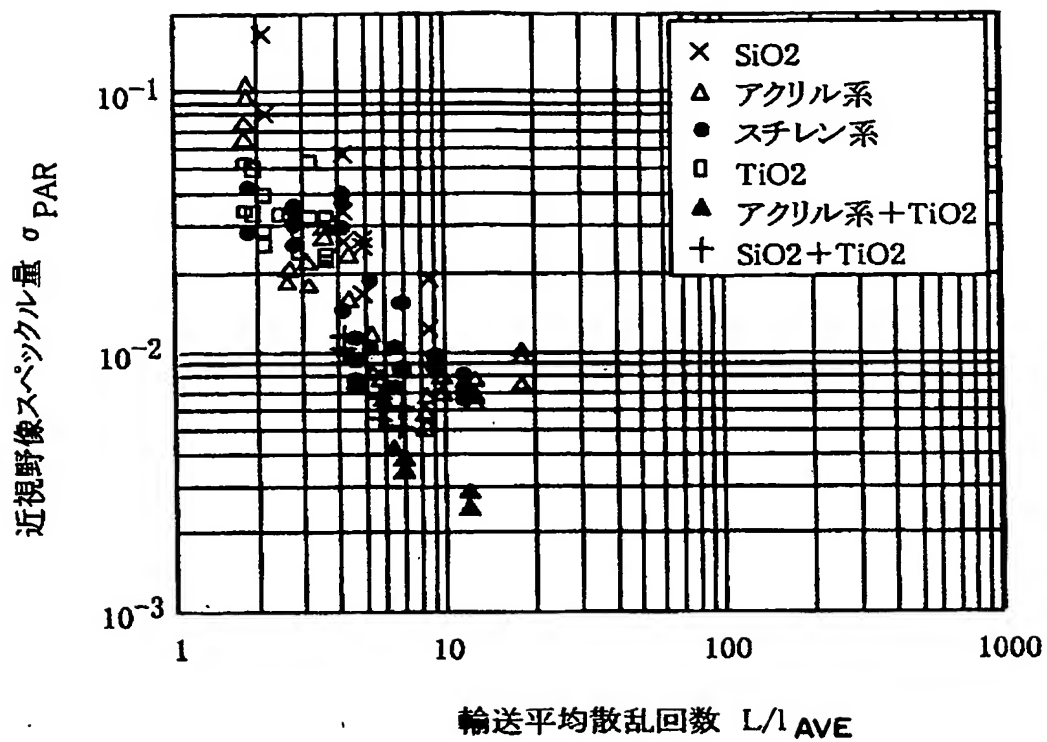
【図10】



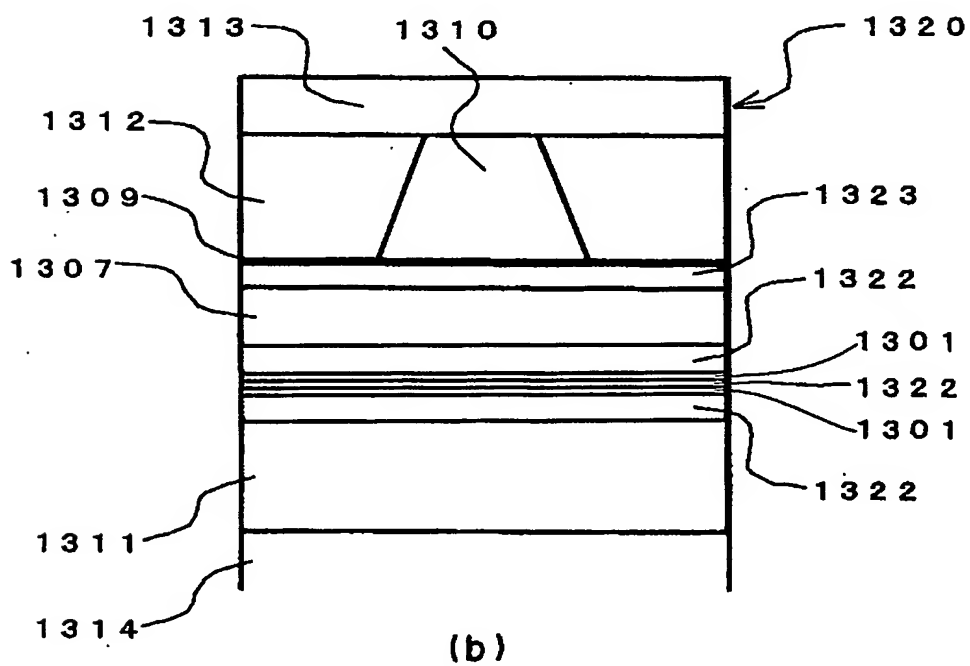
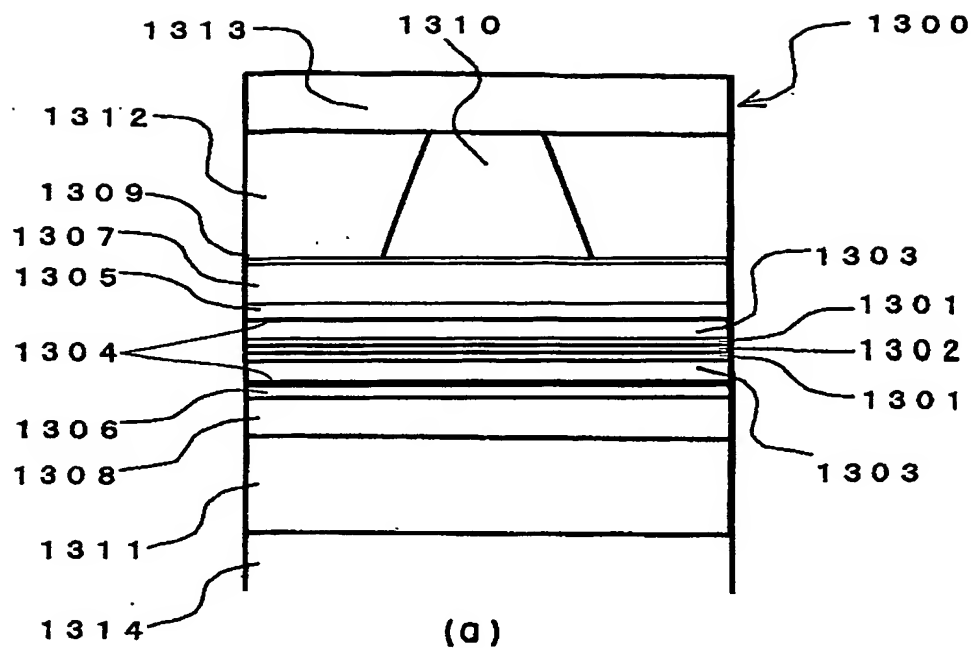
【図11】



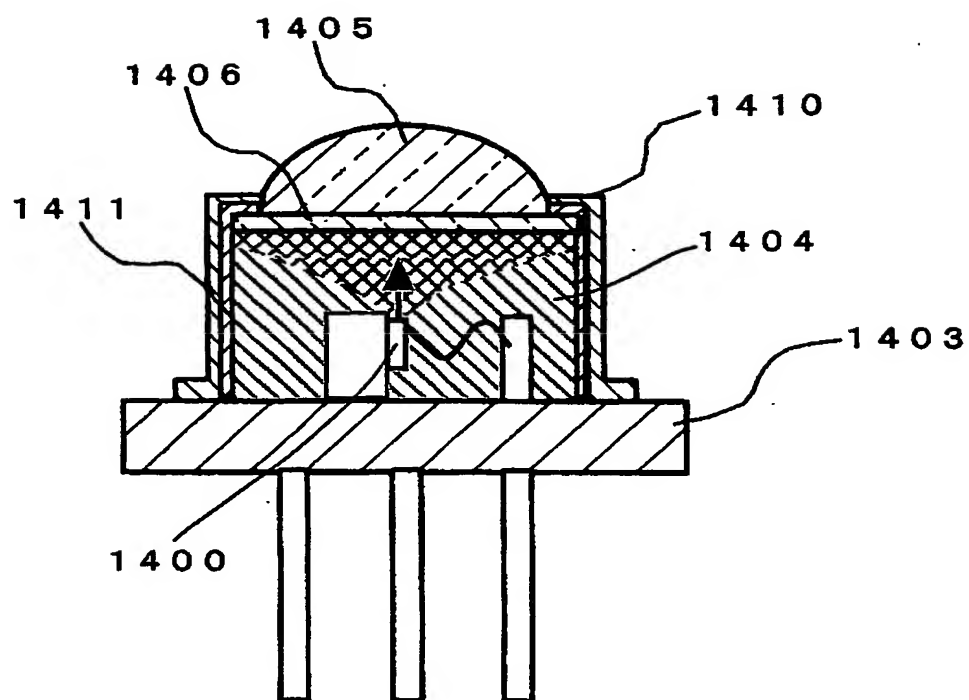
【図12】



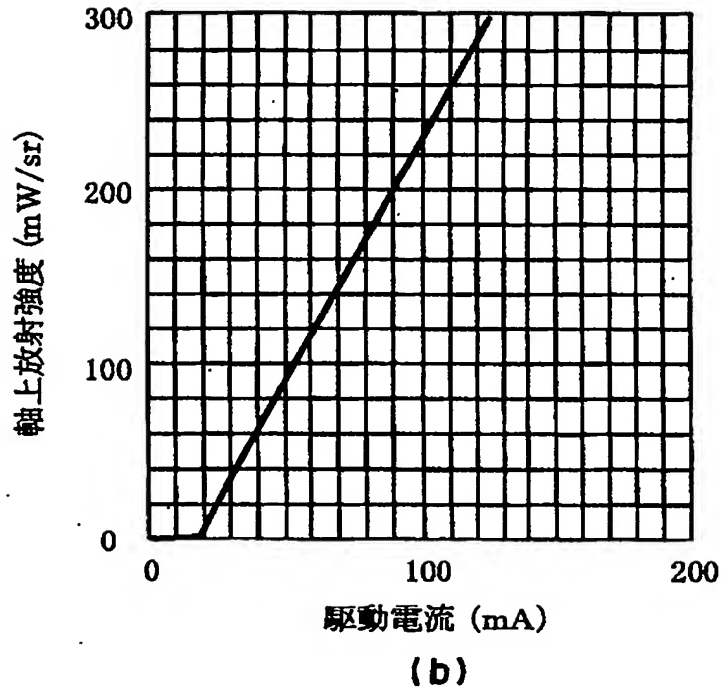
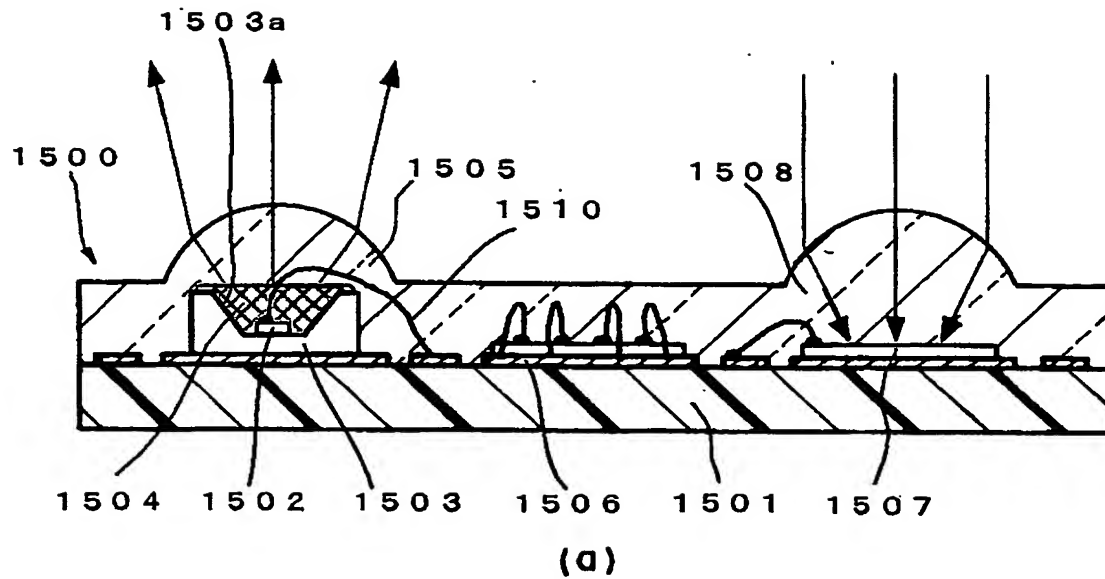
【図13】



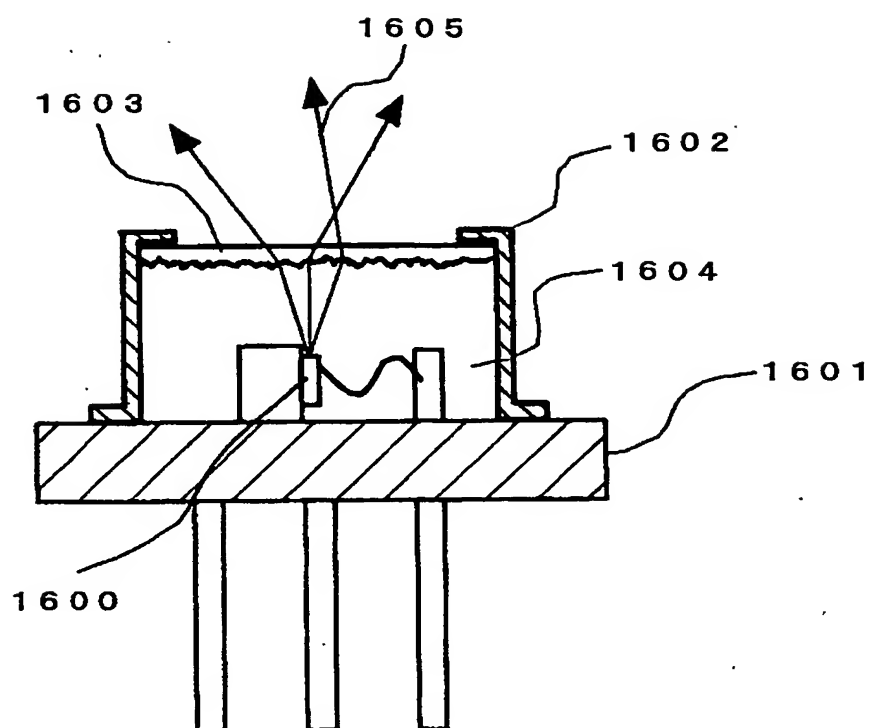
【図14】



【図15】



【図16】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 簡単な構成で、高出力半導体発光素子を用いても人の目に安全で高い光の取り出し効率が得られると共に、低消費電力でかつ小型化と低コスト化ができ、高速かつ広範囲な通信エリアを有する光通信システムに適した光源装置およびそれを用いた光通信モジュールを提供する。

【解決手段】 半導体レーザー200からの誘導放出光が多重散乱光学系を介して自由空間に放出される光源装置であって、多重散乱光学系は、半導体レーザー200に近接する第1の領域204とその第1の領域204に接して自由空間に至る第2の領域205からなる。上記第1の領域204に散乱体を高濃度に含み、第2の領域205は、第1,第2の領域204,205間の境界面に形成される2次的な面光源の少なくとも主要部分に対する拡大鏡としてのレンズ部205aを有する。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005049]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号

氏 名 シャープ株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☒ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.